

プラスチックのケミカルリサイクルと その技術開発（下）

無酸素条件下のプラスチックの熱分解挙動を4つに類型化した。PSのケミカルリサイクル（解重合法）の開発状況をまとめた。混合廃プラ由来熱分解油のナフサクラッキング・重合によるPE・PP・PSの再生（熱分解法）について詳細に調査した。特に、熱分解油メーカー13社の生産能力、技術、製品を集約した。旧札幌プラスチックリサイクルの熱分解技術とコストを調査した。混合廃プラの酸素供給熱分解（ガス化法）の詳細と合成ガスから誘導される化学品（メタノール、エタノールなど）をリストアップした。合成ガス・メタノール周辺は新規の技術が数多く実用化されている。

2020年5月



株式会社 旭リサーチセンター

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

まとめ

◆解重合法、熱分解法、コークス炉化学原料化法に共通する“無酸素条件下のプラスチックの熱分解”を解析し、熱分解挙動を4つに類型化した。解重合型（PS、PMMA）、ランダム分解型（PE、PP）、側鎖脱離型（PVC）、エステル分解型（PET）である。

（5-9頁）

◆PSの解重合法については、PSのグローバルメーカーのINEOS StyrolutionとTrinseoが、解重合技術のスタートアップのAgilyx（米国）とPyrowave（カナダ、高周波誘導加熱技術）と提携して開発中で、米国と欧州に解重合パイロット建設を計画している。一方、東洋スチレンがAgilyxより日本市場の技術ライセンスを取得したことを発表した（2020年4月）。

（10-14頁）

◆熱分解法については、BASFが混合廃プラ由来の熱分解油をナフサクラッカーにかけてプラスチックを再生するクローズドループを実証した（2018年12月発表）。その後、2019年にSABIC、LyondellBasell、DOW、Shellが、2020年にVersalisが同様な取り組みを発表した。いずれも熱分解油メーカーから熱分解油（ナフサ）の供給を受けて、これを自社のナフサクラッカーにかけるというものである。この中で、注目すべきは、LyondellBasellがNeste（フィンランド）の植物油由来のRenewable Diesel（Hydrotreated Vegetable Oil）をナフサクラッカーにかけて、バイオPEとバイオPPの生産に成功したことである。

（15-18頁）

◆欧米の熱分解油メーカー12社をリストアップして、各社の生産能力、技術、製品、事業をレビューした。この中で、注目されるのは、①Quantafuel（BASFと連携してデンマークに廃プラ処理能力60トン/日（18,000トン/年）の熱分解油工場を建設・スタート）、②Plastic Energy（スペインに2つの熱分解油工場（総生産能力7,000トン/年）保有。SABICと提携してオランダに生産能力2万トン/年の熱分解油工場建設中）、③Neste（Renewable Dieselの大手メーカー（生産能力300万トン/年）。熱分解油工場の建設を計画中（廃プラ処理能力20万トン/年規模）。その一環として、熱分解技術をもつRecycling Technologies Ltd.（イギリス）に投資）、④RES Polyflow（4系列の熱分

解油工場（廃プラ処理能力10万トン/年、建設費2.6億ドル）を米国のインディアナ州に建設中）、⑤Brightmark Energy（RES Polyflowの親会社。建設費が10億ドル規模の先進的な廃プラ熱分解油工場の建設用地を選定中）などである。（19-26頁）

◆熱分解油メーカー13社の処理能力、技術、製品を集約し比較した。（26-28頁）

◆2001～2011年にかけて、熱分解法で燃料やナフサ（石化原料）を製造していた旧札幌プラスチックリサイクルの事業と技術を調査した。（29-31頁）

◆各種ケミカルリサイクル手法の再生処理コストと損益を比較したところ、熱分解法はコークス炉化学原料化法やガス化法などに比べ再生処理コストが高く、損益が厳しいことがわかった。設備費が高いことが1つの理由である。（31-33頁）

◆「熱分解（油）—ナフサクラッキング」法（略号：熱分解法）が大規模に実用化されるためには、①熱分解油製造設備のスケールアップと供給能力の大幅アップ、②熱分解油の幅広い留分（ナフサ～ガスオイル）をクラッキングできるフレキシブルなクラッカー設備が必要である。半面、これらの課題を克服できれば、大きなビジネスチャンスになる。（34頁）

◆ガス化法は、日本では昭和電工が実用化しており、合成ガス（一酸化炭素と水素の混合物）からアンモニアを製造している。海外では、2017年以来カナダのEnerkemが合成ガス経由でバイオメタノールとバイオエタノールを製造している（生産能力は3,800万リットル/年）。原料はMSW（都市（固形）廃棄物）である。MSWは紙・段ボール、庭木、プラスチック容器包装材を多く含み、埋め立てられることが多い。EPA（米国環境保護庁）は、EnerkemのエタノールをU.S. Renewable Fuels Standard（RFS）に基づいて製造された“cellulosic ethanol”（セルロース系（バイオ）エタノール）として販売することを承認した。Enerkemはオランダで他社と提携して処理能力36万トン/年のガス化工場の建設を計画している。（35-38頁）

◆合成ガス・メタノール関連は新規の技術が開発され、将来基幹の化学コンプレックスに発展する可能性がある。最近のトピックスとしては、LanzaTechの微生物を使った合成ガスからエタノールをつくる技術などがある。（38-42頁）

目 次

はじめに	1
用語・略語集	3
1. プラスチックの無酸素条件下での熱分解	5
2. ポリスチレン(PS)のケミカルリサイクル(解重合法)	10
3. 「熱分解(油)ーナフサクラッキング」法(熱分解法)の詳細	15
3.1 欧米ナフサクラッカーの発表	15
3.2 熱分解油メーカーの技術と生産能力	19
3.3 熱分解油メーカーのまとめ(生産能力、技術、熱分解油の組成と収率)	26
3.4 旧札幌プラスチックリサイクルの熱分解技術	29
3.5 熱分解法と他のケミカルリサイクル手法のコスト比較	31
3.6 「熱分解(油)ーナフサクラッキング」法の課題と対策	34
4. 「ガス化(合成ガス)ー化学品」法の詳細	35
4.1 概要	35
4.2 昭和電工のガス化プロセス(EUP プロセス)の特徴	35
4.3 ENERKEM のガス化工場	36
4.4 合成ガス・メタノール周辺化学の最近の進歩(参考文献④参照)	39
おわりに	43
謝辞	44
参考文献	44

はじめに

本レポートは「プラスチックのケミカルリサイクルとその技術開発（上）」¹の続編の（下）である。（上）のまとめとして、2つの表を載せた。表1は5つのケミカルリサイクル手法のまとめであり、表2はケミカルリサイクルの年表である。

（下）では、まず無酸素条件下でのプラスチックの熱分解挙動の解説を行い、その後にポリスチレンのケミカルリサイクル（解重合法）、混合廃プラの熱分解法、混合廃プラのガス化法について詳しく述べる。

表 1 ケミカルリサイクルの各種手法の比較

手法	廃プラの例	メーカー例	処理条件	生成物	強み	弱み（課題）
解重合法	PETボトル	日本環境設計	グリコール分解(220°C)	PET⇒BHET⇒PET	<ul style="list-style-type: none"> 着色物・汚染物を除去しやすい 食品包装用途に使用可能 	メカニカルリサイクルよりもコストが高い
		Loop In. Ioniqa	メタノール分解	PET⇒DMT+MEG⇒PET		
	ポリスチレン（単一物）	Agilyx Pyrowave	無酸素熱分解(500°C以上)	PS⇒SM(モノマー)⇒PS		
熱分解法		BASF、SABIC、Lyondell-Basell、DOW、Shell	無酸素熱分解(～400°C)	熱分解油(ナフサなど)	<ul style="list-style-type: none"> 混合廃プラを使用できる 熱分解油をナフサクラッキングして、PE、PP、PSをつくれる(クローズドループ) 	ナフサ成分の選択率、収率アップ
ガス化法	混合廃プラ(PE/PP/PS)	昭和電工 Enerkem	純酸素供給2段階熱分解(600～700°C、1300～1500°C)	合成ガス(一酸化炭素(CO)と水素(H ₂)の混合物)	<ul style="list-style-type: none"> 廃プラや木質バイオマスを原料に使用可能 	<ul style="list-style-type: none"> 純酸素のコストが高い 合成ガスの用途開発が必要
コークス炉化学原料化法		日本製鉄	石炭に～1%混合、コークス炉(無酸素条件、蒸し焼き)で反応(1200°C)	オイル(油)40%、コークス20%、ガス(水素、メタン)40%	<ul style="list-style-type: none"> オイル(BTX)はプラスチック原料にできる 有害物の発生がなし 	生成物のコークス(高炉還元剤)とガス(燃料用)は1回使用
高炉還元剤法		JFEスチール	コークスに～1%添加して反応(高炉2400°C)	高炉中で還元剤として働き、自らはCO ₂ と水になる	<ul style="list-style-type: none"> 廃プラを使用すると、CO₂の発生量がコークス比30%削減できる 	1種の廃プラの燃焼である

出所：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

¹ https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1046.pdf

表2 日本のケミカルリサイクルを中心とする年表(含む社会の重要事項と原油価格)

年	環境に関する重要事項	リサイクル特記事項	原油価格
1995	12月 埼玉県ダイオキシン騒動始まる 容器包装リサイクル法制定	1991-96・BASF 熱分解油プロセス開発 (パイロット、1.5万トン/年)	18
1996	1990年代半ばよりPETボトル普及		22
1997	COP3開催 (「京都議定書」採択) 容器包装リサイクル法本格施行		20
1998			14
1999	「ダイオキシン類対策特別措置法」制定、焼却炉からのダイオキシン排出基準、「循環型社会形成推進基本法」制定	○新潟プラスチック油化センターの熱分解油工場稼働	19
2000	「ダイオキシン類対策特別措置法」施行 容器包装リサイクル法完全施行	○新日鐵/君津、名古屋のコークス炉化学原料工場稼働	30
		○日本鋼管/川崎・水江、福山の高炉還元剤工場稼働	
		○東芝プラントシステムがPS解重合実証テスト (2年間)	
		○道央油化センターの熱分解油工場稼働	
2001		○イーユービー(宇部興産、荏原) のガス化工場稼働	26
		○札幌プラスチックリサイクルの熱分解油工場稼働	
2002	第一次循環型社会形成推進基本計画	○新日鐵/室蘭、八幡工場稼働 (コークス炉化学原料化)	26
2003		○昭和電工のガス化工場稼働(川崎)	31
		○帝人がPETボトルのケミカルリサイクルを開始	
2004		✕ 道央油化センターの熱分解油工場停止	41
		○ペトリバースのPETケミカルリサイクル・川崎工場稼働	
2005		○新日鐵の大分工場稼働 (コークス炉化学原料化)	56
2006			60
2007			72
2008	第二次循環型社会形成推進基本計画、改正容器包装リサイクル法完全実施、9月・リーマンショック	✕ 帝人がPETボトルのケミカルリサイクルを休止	99
		○ペトリバース破綻し、東洋製罐が引き継ぐ(PRT社に)	
2009		2009年以降・PRT社は約2万トンのPETボトル処理	62
2010	EUがフラグシップイニシアティブにRE (資源有効利用)を据える	✕ イーユービー(宇部興産、荏原) ガス化工場 (宇部) 停止	79
		○Cynarがアイルランドの熱分解油工場を稼働	
2011	3月11日・東日本大震災	✕ 札幌プラスチックリサイクル (熱分解油工場) 解散	95
		○協栄産業がPETのボトルtoボトルを実現	
2012			94
2013	第三次循環型社会形成推進基本計画		97
2014		○Plastic Energyがスペインの熱分解油第1工場を稼働	93
2015	9月・SDGsを国連サミットで採択、12月・パリ協定		49
2016			43
2017	12月31日・中国廃プラの輸入禁止	○Enerkemがエドモントン・ガス化工場稼働	51
		○Plastic Energyがスペインの熱分解油第2工場を稼働	
2018	1月・EUプラスチック戦略、6月・G7海洋プラスチック憲章 第四次循環型社会形成推進基本計画	PRT社は東洋製罐資本から日本環境設計資本に	65
		○12月・BASFが熱分解油をナフサクラッキングしてPE、PPに	
2019	5月・政府がプラスチック資源循環戦略決定 7月・G20 (大阪ブルー・オーシャン・ビジョン)	日揮、荏原、宇部、昭電が協業して、国内外にライセンスへ	57
		○協栄産業とサントリーの「FtoPダイレクトリサイクル技術」	
2020	新型コロナウイルス感染症が世界的流行		急落
2021	1月・バーゼル条約改定発効 (汚染廃プラの輸出入禁止)		
2030	国連のSDGs目標達成期限、EUボトル再生材規制発効		

注：リサイクル特記事項の○印は事業のスタート、✕印は撤退・終了を示す。原油価格はWTIの年平均値(単位：ドル/バレル)。緑地はPETのメカニカルリサイクルとケミカルリサイクル、赤地は熱分解法、黄色地はガス化法、青色はコークス炉化学原料化法と高炉還元剤法。

出所：原油価格は世界経済のネタ帳。https://ecodb.net/commodity/crude_wti.html

その他は各種資料より旭リサーチセンターが作成。

用語・略語集

(1) 本レポートで使用したケミカルリサイクルの名称

表 3 本レポートで使用したケミカルリサイクルの名称と略号

リサイクルプロセス全体を表す名称 () 内は生成物を表す	略号またはリサイクルのキー技術		
		別名	英語
「解重合（モノマー）－再重合」法	解重合法	原料・モノマー化	Depolymerization
「熱分解（油）－ナフサクラッキング」法	熱分解法	油化	Pyrolysis
「ガス化（合成ガス）－化学品」法	ガス化法		Gasification
「コークス炉化学原料化（ガス・オイル・コークス）」法	コークス炉化学原料化法		
「高炉還元剤」法	高炉還元剤法	高炉原料化	

出所：旭リサーチセンター作成。

(2) リサイクル関連用語（日本語、順不同）

- ・ 廃プラ：廃棄プラスチック（プラスチック廃棄物）の略。
- ・ リサイクル：広義にはメカニカルリサイクル（マテリアルリサイクル）、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクルを意味し、狭義にはメカニカルリサイクルとケミカルリサイクルを意味する。本レポートでは狭義の意味で使用した。
- ・ リサイクル率：廃プラ A トンのうちの B トンをリサイクル工程に回し、C トンの再生材を得た場合に、 B/A (%) をリサイクル率という場合もあるし、 C/A (%) をリサイクル率という場合もある。定義が不明確なので注意が必要。
- ・ マテリアルリサイクル（材料リサイクル）：廃プラを固体または熔融状態でリサイクルし、再生材を得る手法。メカニカルリサイクルとほぼ同義語。
- ・ メカニカルリサイクル：機械的方法で廃プラを材料リサイクルする手法。ケミカルリサイクルと対比して使用されることが多い。
- ・ 再生材：リサイクル素材と同意語。本レポートでは再生樹脂と同意語。
- ・ ケミカルリサイクル：ISO 15270 ではフィードストックリサイクルと呼ばれる。

- ・リサイクラー：リサイクル事業者のこと。
- ・リサイクルの設備能力：次の2つの場合があるので注意。
 - ①廃プラ処理能力（Processing capacity）と②再生材生産能力。

(3) プラスチックと化学品の名称

PET（ポリエチレンテレフタレート） rPET（PET再生樹脂）
 PE（ポリエチレン、LDPE・LLDPE・HDPEの総称）
 LDPE（低密度ポリエチレン：高圧法）：LLDPEを含めてLDPEと呼ぶ場合もある。
 LLDPE（線状低密度ポリエチレン） HDPE（高密度ポリエチレン）
 PP（ポリプロピレン） PVC（ポリ塩化ビニル）
 PS（ポリスチレン） PMMA（ポリメタクリル酸メチル）
 合成ガス（一酸化炭素(CO)と水素(H₂)の混合物) FAME（脂肪酸メチルエステル）

(4) 石油製品と化学品

表4 石油製品と化学品の名称、性状、用途

名称	英語名	沸点(°C)	密度(g/cm ³)	用途
ナフサ (粗製ガソリン)	naphtha	30~200	輸入ナフサの場合 0.69	石油化学用(ナフサクラッキング用)
ガソリン (揮発油)	gasoline (light oil)	30~200	0.72~0.76	自動車用燃料
ジェット燃料	jet fuel	50~250	0.78~0.80	航空機用
灯油	kerosine、 kerosene	160~270	0.78~0.80	家庭用暖房燃料
軽油	diesel、 gas oil	200~-350 (180~350)	0.80~0.94	ディーゼルエンジン用燃料
重油	heavy oil	粘ちよう液体	0.80~0.96	ボイラー燃料など
メタノール	methanol	65		酢酸、ホルマリン、燃料
エタノール	ethanol	78	0.79	燃料

出所：足立吟也らの「新しい工業化学」表8.1（化学同人）と石油連盟資料などを基に旭リサーチセンターが作成。

1. プラスチックの無酸素条件下での熱分解

PSの解重合法、PE/PP/PS²などの混合廃プラの熱分解法、コークス炉化学原料化法はいずれも無酸素条件下での熱分解である。そこで、詳細な各論に入る前に、共通課題として無酸素条件下での各種プラスチックと石炭の熱分解挙動についてまとめた。

まず、無酸素条件下のプラスチックの熱重量減少曲線を図1に示す。PVCは熱分解開始温度が一番低く、2段階で分解し、炭素系残渣が残る。混合廃プラ（PE/PP/PS）の中ではPS、PP、PEの順で熱分解開始温度が高くなる。またPS、PP、PEはいずれも温度を上げると完全に分解して、残渣は残らない。一方、PETは熱分解開始温度はPSとPPの間にあり、約430℃度以上では減量はわずかで炭素系残渣が残るのが特徴である。またこれらプラスチック類はコークス炉化学原料化法で使用されるグニエラ炭よりずっと早く分解する。

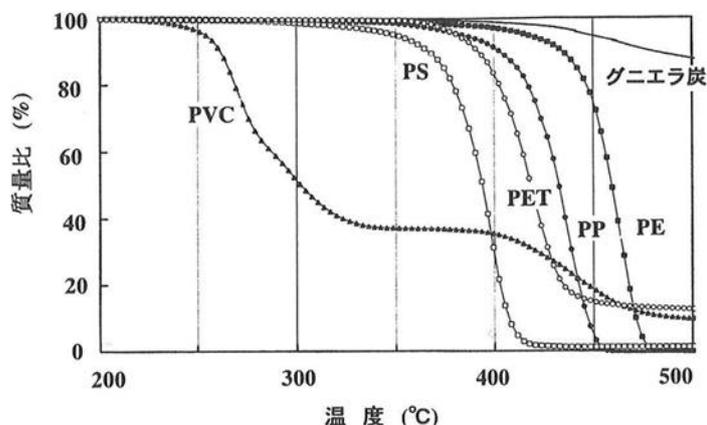


図1 各種プラスチックと石炭の熱重量減少曲線(横軸:温度、縦軸:質量比(%))

注:昇温速度 10℃/min、チッソ雰囲気下(コークス炉を想定して測定)。

出所:加藤健次ら「コークス炉を利用した廃プラスチック化学原料化技術」新日鉄技報 第384号、669頁(2006)。

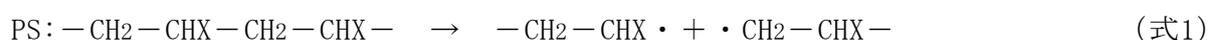
この熱重量減少曲線データや熱分解物の解析から、プラスチックの熱分解挙動(無酸素条件)を4つに類型化した。

² PE/PP/PSの表示はこれらのプラスチックを主体とする混合廃プラの場合に使用する。

(1)解重合型(規則的に解重合してモノマーを生成するもの)

PMMA (ポリメタクリル酸メチル、アクリル樹脂) とポリ (α メチルスチレン) は典型的な解重合タイプであり、熱分解によりほぼ定量的にモノマーが得られる。ポリスチレン (PS) は定量的ではないが、60~70%の比率でモノマーが得られるので、このタイプに分類される。

PSを例にとり解重合のメカニズムを説明すると、まず熱化学的にポリマー鎖が切断してラジカルを生成することから始まる (式1)。切断してできた末端のラジカルが安定していることから、主に末端から順次モノマーに分解する (式2)。



注：ポリスチレンの場合は、式中のXはフェニル基 (Ph) である。

PMMA (繰り返しユニット： $-\text{CH}_2-\text{C}(\text{Me})(\text{COOMe})-$) は生成ラジカルがカルボメトキシ基と共鳴することにより安定化し、さらにPSのような3級水素をもたないため水素引き抜きによるラジカルの移動がなく、定量的にモノマーに解重合する。同様に、ポリ (α メチルスチレン) (繰り返しユニット： $-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{Ph})-$) は生成ラジカルがフェニル基およびメチル基と共鳴することによりラジカルが安定し、また3級水素をもたないため水素引き抜きによるラジカルの移動がなく、定量的にモノマーに解重合する。

一方、PSはメチル基との共鳴はなく、3級炭素に水素があるため生成ラジカルの安定性がポリ (α メチルスチレン) より劣り、一部ラジカルの移動が生じる。このため、モノマーに解重合するものは60~70%で、ラジカルの移動による副生成物の2量体、3量体を生成する。

それ以外に、熱分解にはポリマー鎖中の異種結合が関係している。ラジカル重合は $-\text{CH}_2-\text{CHX}-\text{CH}_2-\text{CHX}-$ のhead to tailの形でポリマー鎖が成長するのが正常であるが、一部 $-\text{CH}_2-\text{CHX}-\text{CHX}-\text{CH}_2-$ のhead to headの異種結合が生じる。この異種結合は不安定で、ここが分子切断しやすいといわれている。PMMAやPSにはこの異種結合が

含まれている。

(2) ランダム分解型(ランダムに分解し分子量分布の広い分解物を与えるもの)

ランダム分解型の代表はポリエチレン (PE) とポリプロピレン (PP) である。この場合の熱分解反応メカニズムは、熱化学的にポリマー鎖が切断してラジカルを生成 ($-CH_2-CHX-CH_2-CHX-$ \rightarrow $-CH_2-CHX\cdot + \cdot CH_2-CHX-$) することから始まる点では解重合型と同じである。ただし、切断してできた末端のラジカルが不安定で、ラジカルがポリマー鎖上をランダムに移動 (連鎖移動) し、そこでポリマー鎖の分解が起こる。このため、分子鎖長 (分子量) 分布の広い分解物になり、モノマー収率は極めて低い。図2、図3に示すように、混合廃プラからつくった熱分解油の分子量分布は広く、沸点範囲が広い。

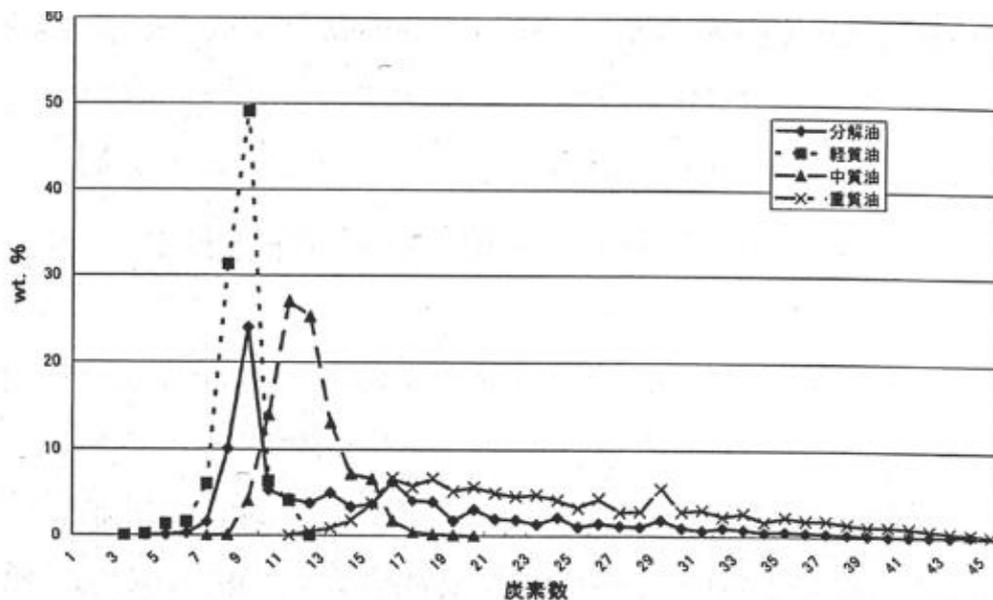


図2 熱分解油の炭素数分布(横軸:炭素数、縦軸:wt%)

図2と図3の注: 分解油(熱分解油のこと)とそれを蒸留して得られた軽質油、中質油、重質油の炭素数分布を示す。

図2と図3の出所: 参考文献⑨ 179-192頁、橘秀昭「一廃系廃プラスチック油化実用化技術の最新動向」(シーエムシー出版、2005年)

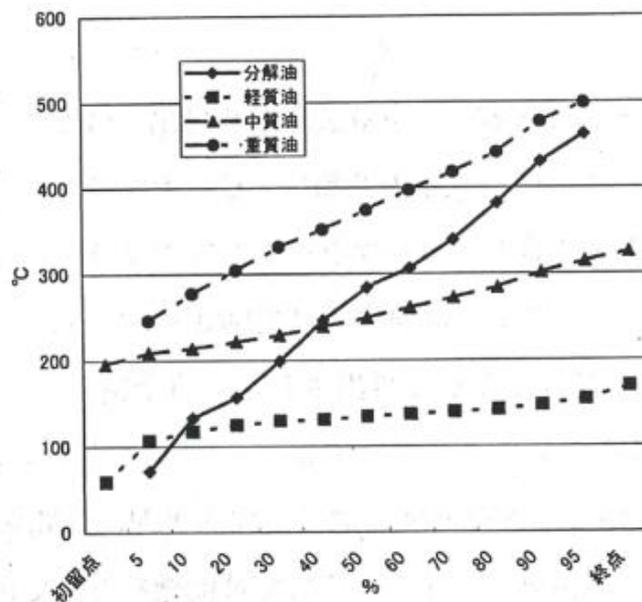


図3 蒸留曲線(横軸:%、縦軸:°C)

これに対して、石油精製の接触分解のようにゼオライト触媒 (HZSM-5 など) を使用して、分子量の高い成分を触媒的に分解して低分子量化させ、分子量分布をシャープにする手法がある。

(3) 側鎖脱離型(熱分解時に塩化水素ガスなどを発生し、熱分解残渣が残るもの)

例はPVC (ポリ塩化ビニル) とPVDC (ポリ塩化ビニリデン) である。PVCはPS・PP・PEと比較して低い温度 (~250°C) で分解を始め、塩化水素を発生する。塩化水素が脱離するとポリマーは共役二重結合のポリアセチレン様構造となり、不飽和度が高くなる(式3)。脱塩化水素により、PVCは約60%減量する。



さらに約400°C以上になるとトルエン、ベンゼンなど芳香族化合物が発生し、その後15%程度の炭素系残渣が残る (図1参照)。

発生する塩化水素は腐食の原因になる。また製品中 (熱分解油など) に塩素が残留

することは好まれない。このため、混合廃プラ中のPVCを350°Cくらいで予備分解させて塩素を除去するプロセスが開発されている（30頁の図7参照）。

(4) エステル分解型(含酸素プラスチックで、加熱時に有害物質が発生するもの)

例はポリエステル(PET)である。図4に示すように、PETは熱分解すると末端カルボン酸ポリマーと末端ビニルポリマーに分解する。それが、さらに分解してテレフタル酸を生成する。また、脱炭酸反応も起こることから安息香酸も一部生成する。

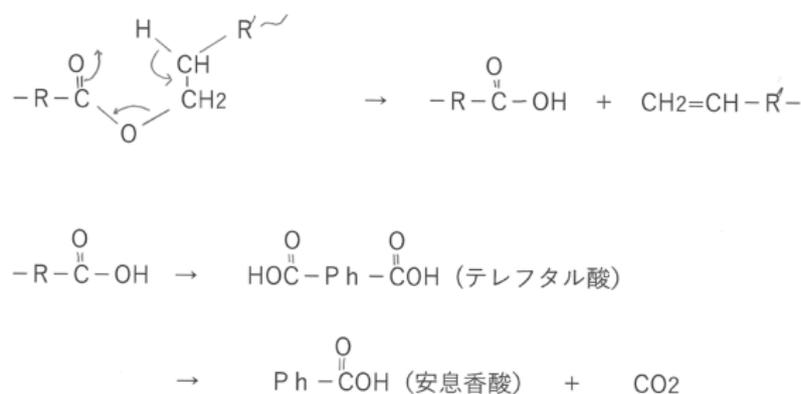


図4 ポリエステル(PET)の熱分解メカニズム

出所：大谷肇、柘植新「高分子の熱分解特性」高分子、46巻6号、264頁（1997）。

安息香酸は結晶化すると配管を詰まらせたり、また設備を腐食する。

また、PETは熱分解時の炭素系残渣が多い。このため、混合廃プラ（PE/PP/PS）の熱分解やPSの解重合の際に、PETが混じることは嫌われる。一般に、無酸素条件下の熱分解系に酸素含有プラスチック（PETなど）が持ち込まれるのは望ましくないといわれる。

2. ポリスチレン (PS) のケミカルリサイクル (解重合法)³

(1) 日本における過去の開発

東芝プラントシステムが2000～2001年度にかけて、PS廃棄物（発泡スチロール）の解重合のパイロット（3トン/日）を山梨県に建設して、実証テストを行った⁴。

プロセスフローと実証試験結果を図5に示す。実証試験結果によればスチレンモノマー回収率は最高で60%となっている。熱分解装置は、高温で短い滞留時間で吸熱反応をさせるのに適した構造である管型熱分解装置を開発し、熱分解および蒸留は減圧下で行っている。なお、このプロセスはまだ実用化されていない。

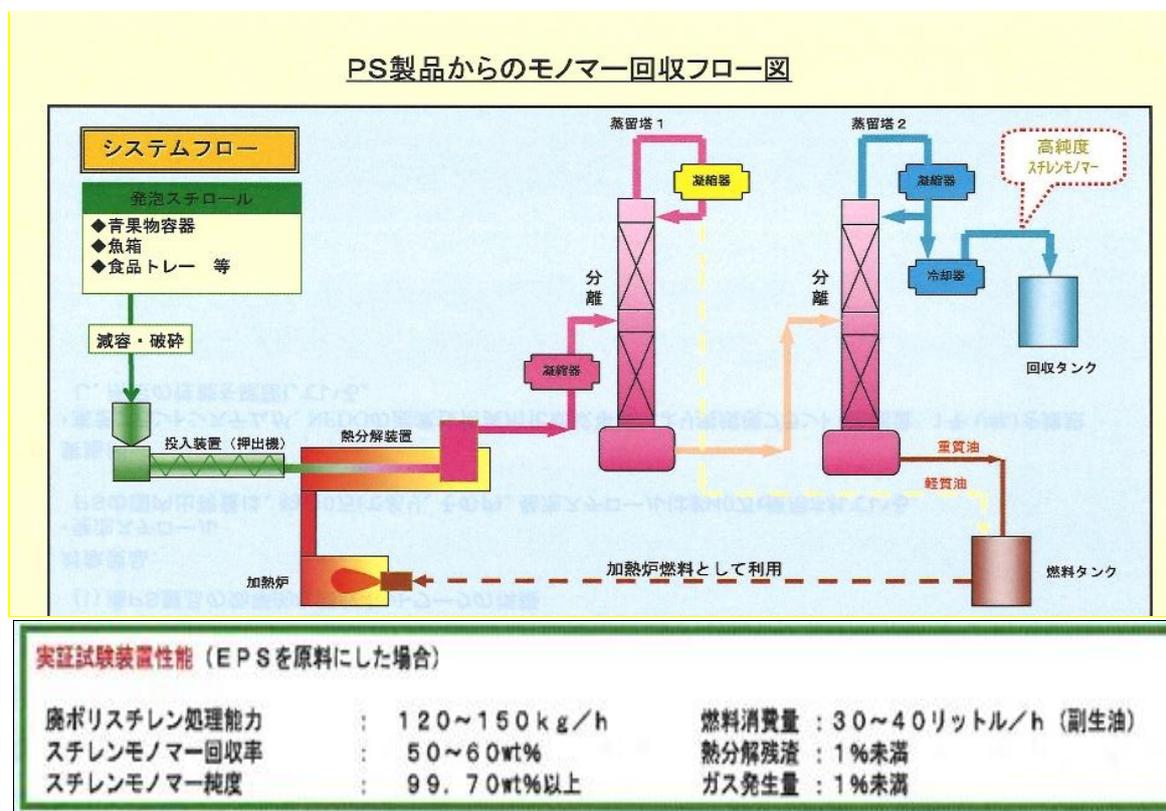


図5 ポリスチレンの解重合プラントのプロセスフロー

出所：東芝プラントシステム（株）、参考文献⑧ 33頁。

³ ポリスチレン (PS) の「解重合 (モノマー) ー再重合」法のこと。

⁴ 平成12年度 NEDO 採択事業

(2)最近の海外における開発

海外では、2018年頃よりPSのケミカルリサイクルの研究開発や提携が活発になった。重要なプレーヤーは、ポリスチレンのグローバルメーカーであるINEOS Styrolution (以下、INEOS Sty. と略す)、Trinseo、AmSty (米国、TrinseoとChevron Phillips Chemicalの50:50の合弁会社)、Total(フランス)などである。

また、もう1つの重要なプレーヤーは、解重合技術を有するAgilyx (オレゴン、米国)、Pyrowave (オンタリオ、カナダ)、INDAVER (オランダ)、GreenMantra (カナダ)などの企業で、スタートアップが多い。

この中で、INEOS Sty. の動きが際立っており、INEOS Sty. 主導で欧米のPSメーカーがまとまって、PSのケミカルリサイクルを実現するものと考えられる。大手PSメーカーが参加しているSCS (Styrenics Circular Solutions) の組織が提携に役立つであろう。

(3)INEOS Sty.などPSメーカーとAgilyxやPyrowaveの提携(共同開発)

表5に最新の提携関係を示す。また、表の下部の注に、プレーヤーの概要を示す。

PSの解重合技術をもつAgilyxはすでに10トン/日のベンチを米国オレゴン州Tigardにもっているが、AmStyと合弁会社を設立して50トン/日のパイロットを米国西海岸に建設することを計画している。またAgilyxはINEOS Sty. と提携し、米国イリノイ州に100トン/日のパイロットを計画している。一方、ヨーロッパでは、AgilyxはSCSメンバーのINEOS Sty.、Trinseo、Total、Versalis (Eniグループ、イタリア) と提携して、50トン/日のパイロットを建設することを計画している。いずれもPost-consumer PS 廃棄物を原料としている。

PS 解重合技術をもつもう 1 つの会社に、Pyrowave がある。2018 年に Pyrowave (解重合技術保有)、INEOS Sty. (再重合技術保有)、ReVital Polymers (回収、分別技術保有) の 3 社は自社のコア技術を持ち寄り共同開発コンソーシアムを設立した。

また、INEOS Sty. を含むSCSメンバーがPyrowaveと秘密保持契約を結んで、Pyrowaveの技術を評価中である。SCS は Pyrowave の小型解重合装置に注目し、分散型リサイクルセンターの可能性を検討する予定である。

表 5 PS メーカーと Agilyx(米国)または Pyrowave(カナダ)との提携関係

PSメーカー	提携先	提携の形態	提携年・月・日	提携の内容：技術・対象廃プラ・処理能力など
AmSty(米国)	Agilyx (オレゴン、米国) 解重合技術	合併会社設立 (50：50)、 Regenyx LLC.	2019.4.30	Post-consumer PS廃棄物を完全にリサイクルして新しいPSに再生することが目的。米国西海岸に50トン/日の処理プラントをつくることを計画。Agilyxのもつ10トン/日の処理プラントは合併会社に帰属か。
SCSメンバーの INEOS Sty. と Trinseo	同上	コラボレーション	2019.7.10	ヨーロッパにケミカルリサイクルプラント計画：処理能力50トン/日（Post-consumer PS廃棄物の処理）。再重合PSは食品容器・包装分野に使用。
INEOS Sty.	同上	PSリサイクルプラント 計画	2019.12.9	米国・イリノイ州（シカゴ周辺）に立地、処理能力100トン/日（Post-consumer PS廃棄物）。Agilyxの再生スチレンモノマーはINEOS Sty.のスペックに合格。
INEOS Sty.	Pyrowave（カナダ）、ReVital Polymers（カナダ）	3社共同（コンソーシアム）	2018.9.19	Pyrowaveの特許化されたPSの触媒的マイクロ波解重合技術、ReVital PolymersのPSの分別・回収技術、INEOS Sty.の再重合技術を統合。
SCSメンバー （INEOS Sty. Total、Trinseo、 Versalis(Eni)）	Pyrowave(カナダ)	P社技術の評価(秘密保持契約)	2020.1.29	SCSはPyrowaveの小型解重合装置に注目、分散型リサイクルセンターの可能性。Pyrowaveは小型装置の提供。

注

INEOS Styrolution (INEOS Sty.)	INEOSグループ (欧州と米国)	スチレンモノマー、ポリ スチレン、ABSのメー カー	売上高： 54億ユーロ	10か国に20工場、従業員約3,500人。2025年までに、容器・包装用のすべてのポリスチレンの再生材含有率を少なくとも30%にすることを目標にしている。
Trinseo	製品：プラスチック、ラテックスバインダー、合成ゴム。売上高38億ドル(2019)、世界に17の生産拠点、従業員約2,700人			
AmSty	TrinseoとChevron Phillips Chemical の50：50の合併会社（米国）			
Agilyx	本社：オレゴン、米国 熱分解油製造、PS解重合技術（14年の経験）			
Pyrowave	本社：オンタリオ、カナダ	解重合技術	8年間の研究 実績	ユニークな特許化されたマイクロウェーブ技術を使った触媒的マイクロウェーブ解重合技術を有する。
ReVital Polymers	オンタリオ、カナダ	廃棄物処理会社		Post-consumer packageの回収と選別
SCS (Styrenics Circular Solutions)	スチレン系プラスチックのリサイクル技術を共同で開発することを目的に設立された組織。			

出所：各社のプレスリリースなどより旭リサーチセンター作成。

Pyrowave はユニークな特許化された触媒的マイクロウェーブ解重合技術を有している。マイクロウェーブ技術とは、高周波誘導加熱技術のことで短時間で所定温度に上げられることが特徴である。日本でもマイクロ波化学（大阪）が高周波誘導加熱を利用した化学反応を研究、実用化している。高周波誘導加熱を用いた製造装置は大型化（スケールアップ）が難しく、小型装置に限られる点が課題である。

一方、Agilyx は技術内容を明らかにしておらず、Agilyx を出願人として USP を検索したが該当件数ゼロで情報が得られなかった。Agilyx はもともと混合廃プラの熱分解による熱分解油の製造に携わっていた企業で、そのノウハウで PS 廃棄物の解重合法の開発にシフトした。PS の解重合法については問い合わせが多く、熱分解法よりずっと魅力的であると言っている。

表 5 の提携関係からすると Agilyx 技術が本命に思われる。また、大型設備は Agilyx で、小型設備は Pyrowave というすみわけになる可能性もある。

(4)INEOS Sty.のその他の活動

INEOS Sty. は表 5 の提携活動以外にも、いくつかの提携や自社開発を行っている。

2019 年 5 月に GreenMantra（カナダ）と共同開発契約を結んだ。GreenMantra は触媒的解重合技術で①低分子量 PS と②スチレンモノマーをつくるのが特徴である。USP10,457,886 によれば、触媒に Fe-Cu-Mo-P/Al₂O₃ を使い、押出機で解重合している⁵。

INEOS Sty. は 2019 年 7 月には INDAVER（オランダ、欧州の廃棄物を処理する会社、売上高 5.4 億ユーロ、従業員約 1,700 人）と提携した。INDAVER は、Flemish Universities の開発した解重合・精製技術を基に、2021 年第 1 四半期に 15,000 トン/年の処理能力をもつ工場がアントワープに完成する予定である。工場は PS 解重合とポリオレフィンの熱分解の両方に使用する。解重合 PS モノマーを、アントワープの INEOS Sty. に供給することを想定している。

INEOS Sty. は自社開発や BMBF（ドイツ政府のファンド）を使った Resolve project で、PS の解重合に関する研究を行っている。すでに、自社で解重合スチレンモノマー

⁵ GreenMantra は廃ポリオレフィンを熱分解して、付加価値の高いワックスをつくる技術をもっている。

からの再重合品（PS）がバージン PS と同じ品質であることを証明している。解重合実験によれば、生成物は液状生成物と固体生成物があり、液状生成物の組成はスチレンモノマー64%、スチレンダイマー・トリマー16%、ベンゼン・トルエン・AMS・エチルベンゼン5%、その他15%となっている。

Resolve project では押出機で解重合を行っており、2か所のベントからスチレンモノマーを回収する実験をYouTubeで紹介している。この押出機を使った解重合はPETの混入に敏感であるが、ポリオレフィンが10%くらい混ざってもよいと述べている。

(5) 東洋スチレンが Agilyx(米国)より技術導入

日本では東洋スチレンが Agilyx(米国)と技術ライセンス契約を締結したことを親会社のデンカが発表した（2020年4月13日）。デンカのプレスリリースの抜粋を以下に示す。

“「ポリスチレン樹脂のケミカルリサイクルの事業化に着手」

デンカ株式会社の持分法適用関連会社である東洋スチレン株式会社は、使用済み PS（ポリスチレン）のケミカルリサイクル事業化に向け、プラスチックリサイクルのグローバル企業であるアジリックス社（本社：米国オレゴン州ポートランド、CEO：ジョー・ヴィランコート）と日本国内市場における技術ライセンス契約を締結しました。当社千葉工場（千葉県市原市）内に、使用済み PS を熱分解しその原料である SM（スチレンモノマー）を再生する実証設備（年間処理能力：約 3 千トン）建設の具体的検討に着手し、2021 年度末の操業開始を目指します。”

3. 「熱分解（油）ーナフサクラッキング」法（熱分解法）の詳細

3.1 欧米ナフサクラッカーの発表

BASFの2018年12月の発表以来、2019年にSABIC、Borealis、LyondellBasell、DOW、Shell、2020年にVersalisから同様な実証や計画が発表された。各社が提携した熱分解油メーカーとナフサクラッカーの所在地と実施内容を表6にまとめた。

表6 廃プラの「熱分解（油）ーナフサクラッキング」法の実証と計画

大手化学メーカー（ナフサクラッカー）、「プロジェクト名」	提携先・熱分解油メーカー（工場所在地）	大手化学メーカーのナフサクラッカー所在地と実施内容
BASF 「ChemCycling™プロジェクト」	Recenso（ドイツ）	ドイツ・Ludwigshafenのナフサクラッカーで実証
	Quantafuel（デンマーク）	ドイツ・Ludwigshafenのナフサクラッカーで実用化を計画
SABIC 「TRUCIRCLE™ Solutions」	Plastic Energy（スペイン）	オランダ・Geleenのナフサクラッカーで実施の計画（Plastic EnergyはGeleenに2万トン/年の熱分解油工場建設中）
OMV 石油精製会社 「OMV ReOil project」	Borealis（オーストリア） ポリオレフィン製造、メカニカルリサイクル事業	オーストリア・Schwechatの石油精製プラントで計画（現在パイロット研究中）、熱分解油を石油精製プラントに戻すリサイクル、Borealisの工場はOMV工場に隣接
LyondellBasell	Neste（フィンランド）	ドイツ・Wesselingのナフサクラッカーで数千トン生産：PPとLDPEを併産、植物油廃棄物由来のDiesel油を原料とするのでバイオ含量が30%以上のPPとLDPEが得られた
DOW	Fuenix Ecology Group（オランダ）	オランダ・Terneuzenのナフサクラッカーで実施の計画 100%再生材プラスチックの生産を計画
Shell	Nexus Fuels（米国）	米国・ルイジアナ州のナフサクラッカーで少量テスト済み
Versalis（Eniグループ） 「Hoop™」	Servizi di Ricerche e Sviluppo(S.R.S.)（イタリア）	初期的計画の段階、S.R.S.は熱分解技術のエンジニアリング会社。イタリア・Mantovaで6,000トン/年の熱分解油プラント建設の計画。

出所：各社プレスリリースより旭リサーチセンターが作成。

(1) BASF

BASFはRecensoから熱分解油の供給を受けて、ドイツ・Ludwigshafenのナフサクラッカーに投入して実証テストを行った。BASFはこのリサイクルをChemCycling™プロジェクトと命名している。マスバランス方式に基づき、再生原料の割合を認証済みの手法

を用いて最終製品に割り当てることができ、顧客はそれぞれ、再生原料の割合を選ぶことが可能としている。また、BASFはChemCyclingTMプロジェクト代替手法として、廃プラからつくられる合成ガスの利用も検討している。

BASFはRecensoと提携して熱分解油パイロットを増設するとともに、別の熱分解油供給元としてQuantafuelと提携した。BASFはQuantafuelに2千万ユーロを支払い、製造される熱分解油のfirst refusal right（優先買取権）を取得した⁶。

(2) SABIC

SABICはPlastic Energyより熱分解油の供給を受けて、オランダのGeleenでナフサクラッキングを行う予定である。Plastic EnergyはGeleen近郊に2万トン/年の熱分解油工場を建設中である。Plastic Energyはすでにスペインに2つの熱分解油工場（総生産能力7,000トン/年）をもっているため、今回はそのスケールアップになる。

SABICは2020年1月に開かれた世界経済フォーラム（ダボス会議）で、Plastic Energyと共同で熱分解とナフサクラッキングによるリサイクルを進めることを発表し、その取り組みをTRUCIRCLETM Solutionsと命名した。2021年にセミコマーシャルプラント稼働する予定である。

(3) OMV—Borealis

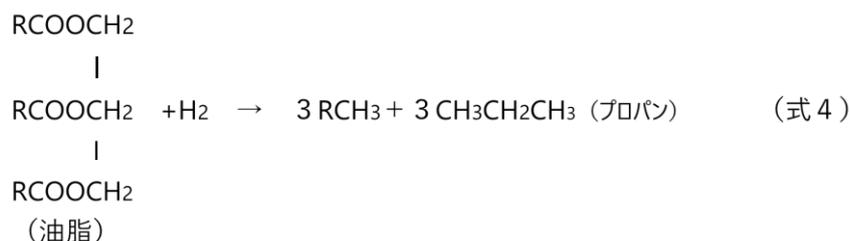
OMV—Borealisの計画は他とは異なり、熱分解油を石油精製工場に戻す方法である（OMV ReOil projectと命名）。現在、100kg/時のパイロットをもっている。Borealisはオーストリアのポリオレフィンメーカーで、廃プラのメカニカルリサイクル事業に参入している。OMVはBorealisの第2位の株主でオーストリアの石油精製メーカーである。両者の工場はオーストリアのSchwechatにあり、隣接している。

⁶ <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2019/10/p-19-356.html>
https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP521622_Y9A011C1000000/

(4) LyondellBasell

LyondellBasell はドイツの Wesseling にあるナフサクラッカーで、Neste の Renewable Diesel（再生可能ディーゼル：Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) ともいう）をバージン原料とともにクラッキングした。そして得られたオレフィンより LDPE と PP を数千トン同時に生産した。得られた LDPE と PP はバイオ含量 30%以上のバイオマスプラスチックであった。これは、ナフサクラッカー投入原料中の Renewable Diesel の比率が 30%以上だったことを意味している。このように Diesel（ディーゼルまたはガスオイル）の比率が高い原料を使って実生産ができたことは、使用したナフサクラッカーのフレキシビリティが高いことを示している（34 頁の 3 章 3.6 参照）。

Neste の Renewable Diesel は、植物由来の廃棄物油や残渣油（いずれも油脂）を水素添加（Hydrotreat）してつくられた炭化水素（RCH₃）である（式 4）。水素添加反応の副生物はプロパンである。



Renewable Diesel はいわゆるバイオディーゼルとは異なる。バイオディーゼルは、油（油脂）をメタノールとエステル交換反応させてつくられた FAME（fatty acid methyl ester）と呼ばれる脂肪酸メチルエステル（RCOOCH₃）である。

ちなみに Borealis はベルギーで、Neste の副生物プロパンを脱水素してプロピレンをつくり、それを原料にバイオ PP を製造することを開始した（2020 年 3 月 20 日発表）。

(5) DOW

DOW は Fuenix Ecology Group より熱分解油の供給を受けて、オランダ Terneuzen で 100%再生材プラスチックをつくる計画を 2019 年 8 月 29 日に発表した（100%再生材プラスチックをつくるためには、熱分解油 100%でナフサクラッキングすることになるので意欲的計画である）。本計画は、2025 年までに EU で販売しているプラスチックのう

ちの少なくとも 10 万トン/年を再生材プラスチックにするという DOW のコミットメントに貢献するものであると同社はコメントしている。

(6) Shell

2019 年 8 月 29 日に、Shell は Nexus Fuels と提携してルイジアナ州の Norco のナフサクラッカーで、廃プラ由来の再生材プラスチックを製造したことを発表した。量はわずかのようなのである。Shell は熱分解油のセカンドソースとして、Nexus Fuels 以外の熱分解油メーカーを探している。

Shell は年間 1,000 万トンのプラスチックなどのケミカルズを生産しているが、2025 年にはそのうちの 100 万トンのプラスチックをリサイクルすることを目標にしている。

(7) Versalis (Eniグループ)

Versalis は熱分解技術をもつエンジニアリングメーカーの Servizi di Ricerche e Sviluppo (S. R. S.) (イタリア) と熱分解油製造技術に関する共同開発契約を締結した (2020 年 2 月 17 日)。混合廃プラの熱分解技術の確立が当面の課題である。将来、イタリア・Mantova で能力 6,000 トン/年の熱分解油工場を建設する計画である。これは Versalis のプラスチックのサーキュラーエコノミープロジェクト (HoopTM と命名) のスタートである。Versalis は Eni グループ (イタリア) の化学会社で、イタリアに本拠地を置くグローバル企業である。ナフサクラッカーをもち、モノマーなどの中間体、PE、PS、合成ゴムや食品包装材料を生産している。

(8) 日本における最近の開発

三井化学と日産自動車は共同で、「自動車廃プラスチック油化技術の開発」を 2017 年度～2019 年度に行い、2019 年 3 月 31 日に報告書を発表した。目的は ASR (Automobile Shredder Residue) より回収された廃プラスチックを油化し、自動車用プラスチック等の石油化学製品原料となるナフサ代替としてケミカル リサイクルするための技術検証

を行うことである⁷。

3.2 熱分解油メーカーの技術と生産能力

熱分解油の技術開発や製造に携わる欧米 12 社を下記にリストアップした。ナフサクラッカーとの提携状況、熱分解技術、生産能力、製品などについて記した。

(1) Recenso (ドイツ、BASF提携先)

Recenso はドイツの Remscheid にある産業プラントメーカーで、メカニカルリサイクルとケミカルリサイクルの両方の機械とシステムを提供している。

ドイツの Ennigerloh に熱分解のパイロットプラントをもっている。CTC と命名した固有の熱分解技術をもつ。CTC とは Catalytic Tribochemical Conversion の略で、固有の触媒を使用した摩擦ケミカル変換技術である。CTC はワンステップの触媒を使った液化プロセスで、分解温度は 400℃、C₂₆ 以下の留分を蒸発させ、冷却して凝縮液体を収集する。CTC では分解炉内で熱的、触媒的、物理的（摩擦：Tribology）作用が働いている。熱分解時のエネルギーの供給源は摩擦である。触媒は 1 回ごとに消費する。

CTC は、原料として混合廃プラが使用でき、40%までバイオマスが混じっていても、PET、PVC、難燃剤が入っても構わない。また、農業廃棄物（バイオマス）単独原料の熱分解油製造の開発と事業を進めている（ブランド名：CONVERBIO）。

パートナーズに最初に提供したのは少量であるが、スケールアップのためパートナーズとともに世界最大のパイロットプラントの設計を終えている。

⁷ https://www.nissan-global.com/JP/ENVIRONMENT/A_RECYCLE/R_FEE/SAISHIGEN

報告書の抜粋：課題に対する成果、

課題① ケミカルリサイクル用の油化原料として ASR 中のオレフィン回収量 5 万トンを前提に調達ネットワーク、物流コスト、油化原料として不純物を除去するための選別工程と設備投資規模を試算、事業としての成立性を検討し課題を抽出した。

課題② 油化技術として、触媒による接触分解方式（HiCOP 方式）を選定した。HiCOP 方式による ASR 油化検証において、ナフサ相当の炭化水素油が得られることが分かったが、目的とするパラフィン成分だけでなく、オレフィン成分や芳香族成分も多く生成した。

今後、油化条件の適化による生成油の性状、収率の適化、および生成油の不純物除去（ASR 選別工程 ASR 油化工程）について検証を実施する。

(2) Quantafuel(ドイツ、BASFの提携先)

Quantafuel はノルウェーの技術ベースのエネルギー会社で、廃プラから熱分解油を製造する。社員は 11~50 名程度である。

デンマークの Skive にヨーロッパ最初の工場を建設している。廃プラ処理能力 60 トン/日 (18,000 トン/年) で、2019 年第 4 四半期に稼働の予定である。そして、高性能な再生燃料を 1,500 万リットル/年以上生産することになる。なお、工場建設には BASF の協力を得ており、BASF 社員が Skive に駐在している。

2019 年 10 月 7 日に、BASF と Quantafuel は混合廃プラのケミカルリサイクルを共同で進めることに合意し、BASF は Quantafuel に 2 千万ユーロを支払い、新工場で生産された熱分解油の first refusal right (優先買取権) を取得した。

Quantafuel は特許化された熱分解技術を有する。コアは触媒技術である。熱分解生成物は、原料廃プラ 100wt%に対して、軽質油 (C6~C12) 16wt%、ディーゼル (C11~C21) 56wt%、重質油 (C20~C28) 8wt%、灰分 (70%カーボン) 10wt%である。軽質油とディーゼル留分に注目しており、軽質油はケミカルリサイクル用に販売する。灰分はアスファルトやカーボンブラックに添加されて使用される。

(3) Plastic Energy(イギリス、SABIC提携先)

Plastic Energy は 2011 年に設立されたロンドンに本社がある会社である。熱分解油工場をスペインに 2 か所、Seville (2014 年に稼働) と Almeria (2017 年稼働) にもっており、総生産能力は 7,000 トン/年である。スペインの石油会社 Repsol にディーゼルとナフサを 3 年間供給してきた。

熱分解技術は TAC (Thermal Anaerobic Conversion : 無酸素条件下の熱分解) と呼び、製品の熱分解油は TACOIL (Thermal Anaerobic Conversion Oil) と呼んでいる。技術はイギリスの Cynar からライセンスを受けたものである (Cynar プロセス)。Modular plant では、1 トンの廃プラから 850 リットルの熱分解油が得られる。プロセスに受け入れられる廃プラは、LDPE、HDPE、PP、PS である。

SABIC のオランダの Geleen のクラッカーに、熱分解油を供給する計画を発表し、そのための熱分解油工場（生産能力は 2 万トン/年）の建設にとりかかっている。新工場は、廃プラ管理会社の Renewi と顧客の SABIC (Geleen) が近くにいるメリットがあるという。Renewi が地元から廃プラを収集し、Plastic Energy が熱分解油を製造し、それを Geleen のナフサクラッカーに投入する。

Plastic Energy はアジアに 10 の熱分解油工場を建設する計画をもち、マレーシア工場とインドネシア 5 工場を建設する計画が具体化して MOU（基本合意書）を締結した。東南アジアで大きな問題になっている海洋プラスチックごみ問題の有力な解決策になることが期待される。ただし、分別収集の習慣がないことが支障になっているようである。

(4)Cynar Plc(イギリス、Plastic Energyに技術ライセンス)

イギリスの熱分解油技術開発のスタートアップ企業で、今は存在しない。実質的に Plastic Energy に引き継がれた。CEO の Michael Murray は 2011 年 10 月の講演で、熱分解油技術の最初のパイロット運転は日本で行われたことを述べている。Cynar は特許化された固有技術を使って、2010 年（2008 年）にアイルランドに工場を建設した。処理能力は選別された廃プラとして、20 トン/日、製品 150 万ガロン/年である。プロダクトは廃プラ 1 トン当たり、ディーゼル 185 ガロン（700 リットル）、ガソリン 53 ガロン（200 リットル）、ケロシン 26.5 ガロン（100 リットル）、合成ガス 16 ガロン、残留炭素 5%である。分解温度は 370-420℃である。工場は 2014 年に休止した。

図 6 に Cynar の特許記載のプロセスフローを示す⁸。廃プラ供給用押出機 2 機、熱分解槽（熱分解炉のこと）とコンタクターのセットが 4 台、蒸留塔 1 基、減圧蒸留塔が 1 基の構成で、プロダクトは、合成ガス、ガソリン、灯油、ディーゼルである。

プロセスの最大の特徴は、熱分解槽（図の（6））の上部にコンタクター（7）を連結していることである。熱分解槽（6）で生成した一定分子量以下（沸点以下）の成分は蒸発して、コンタクター（7）に入る。コンタクター（7）の構造は図 6 の左上に記され

⁸ 特許明細書の図は Michael Murray の講演内容とよく一致している。講演は、「Converting End of Life Plastic into Diesel, The Cynar Experience」Rockwell Automation Process Solutions User Group (PSUG), November 14-15, 2011 Chicago.

/年)であり、フィンランドの Porvoo、オランダのロッテルダム、シンガポールで生産している。Neste は Renewable Jet Fuel の大手供給者でもある。

Neste は LyondellBasell のナフサクラッカーに Renewable Diesel を供給する一方、自らも廃プラから熱分解油を製造することを計画している (2030年までに廃プラ 100 万トン/年の処理を目標としている)。すでにいくつかの有力なリサイクル関連企業との提携を進めている。例えば、2019 年 10 月 23 日に、Remondis (リサイクリング、サービス、水に関する世界最大の企業の 1 つ) と廃プラのケミカルリサイクルについて提携した。目標は廃プラを年間 20 万トン処理する工場の建設である。また、2019 年 11 月 12 日には、Neste は Ravago (ポリマーの物流とリサイクルの企業) と廃プラのケミカルリサイクルについて提携した。目標は同じである。Ravago は現在年間 30 万トン以上の廃プラをメカニカルリサイクルする実績をもち、今後 10 年間で 3 倍に処理量を増やしたいと考えている。また、2020 年 3 月 9 日には、Neste は Mirova (投資会社) と共同で、Recycling Technologies Ltd. (イギリス) に 1,000 万ユーロを投資することに合意した。目的はプラスチックのサーキュラーエコノミーへの移行 (transition) を加速するためのケミカルリサイクルの開発である。

(6) Recycling Technologies Ltd.(イギリス)

Recycling Technologies Ltd. は固有の熱分解技術 (ブランド名 RT7000) をもち、デモンストレーションプラントを 2018 年から稼働させている。プロセスの心臓部は Thermal Cracker (高温の粒子状熱媒体 (hot thermo-granules) を含む流動層) と Generator (熱分解で副生したガスを燃焼させ 850~900℃の熱源をつくる装置) である⁹。商業プラントはスコットランドに建設の予定である。処理能力は廃プラ (乾燥ベース) 7,000 トン/年である。

製品のブランド名は Plaxx®で、燃料用途には使用せずプラスチック製造用途に使用する。また、同社は CITEO が主導するフランスのケミカルリサイクルのプロジェクトに参画している。

⁹ <https://recyclingtechnologies.co.uk/technology/the-rt7000/>

(7) Fuenix Ecogy Group (以下Fuenix Ecogyと略す。オランダ、DOWの提携先)

Fuenix Ecogy はオランダの Weert をベースとする企業で、混合廃プラより固有の熱分解技術 (Fuenix Ecogy®ハイブリッド技術) で、ナフサ、パラフィン、LPG を製造する。1 kgの廃プラから、半分の二酸化炭素 (CO₂) 排出量で 70% (0.7 kg) の新しいプラスチック (再生材) が得られると PR している。

DOW は、Fuenix Ecogy より熱分解油の供給を受けて、オランダ Terneuzen で 100%再生材プラスチックをつくる計画を発表した (2019 年 8 月 29 日)。Fuenix Ecogy は自社の技術をスケールアップする良い機会であるとコメントしている。

(8) Nexus Fuels (米国、Shell提携先)

Nexus Fuels によれば¹⁰、「同社はジョージア州アトランタに 50 トン/日のスケールアップ可能な商業プラントをもっている。廃プラは LDPE、HDPE、PP、PS を使用している。ソースは Post-industrial 廃棄物 と Post-retail 廃棄物で、Post-consumer 廃棄物は汚染がひどいので使用していない。プラントは他の熱分解法に比べ、EROEI (energy returned over energy invested) が 5 倍優れ、廃プラ 1 トン当たりの液体生成物が 25% 多く、炭化物が少ない。そしてコストは 25%安い」。

2019 年 8 月 29 日に、Shell は Nexus Fuels と提携してレイジアナ州の Norco ナフサクラッカーで廃プラをリサイクルして再生材プラスチックを製造したことを発表した。数量はわずかのようである。Nexus Fuels は Shell と協力して、熱分解油製造能力 50 トン/日のパイロットを建設する Norco Pilot Project を立ち上げた。

(9) RES Polyflow (米国、オハイオ州)¹¹

RES Polyflow は、現在は Brightmark Energy の子会社である。

¹⁰ <https://www.plasticstoday.com/sustainability/shell-uses-plastic-waste-produce-resin-feedstocks/127417080662263> (2020 年 1 月 21 日)

¹¹ <http://www.respolyflow.com/> (横型の反応器写真あり)、USP8,137,508 (March 20, 2012) (図面あり)

RES Polyflow は、汚染された混合廃プラを熱分解してナフサ、distillate（中間留分）、パラフィンワックスに転換する技術を有する。この技術はプロセス依存性が高く、廃棄物の依存性は小さい。したがって廃棄物の変動に対応できる。RES Polyflow は Post-consumer または Post-industrial 廃棄物（たとえば、PET、HDPE、Mixed3-7）を受け入れるが、前処理を行ってから熱分解している。

デモンストレーションプラントをオハイオ州にもっている。

現在、4系列の熱分解油工場をインディアナ州の Ashley に建設中で、建設費は2.6億ドルである。着工は2019年5月である。廃プラの処理能力は10万トン/年である。1系列の熱分解炉の能力は6,000ポンド/時である。

2018年3月のBPとの契約では、BPが新工場のディーゼル、ナフサ、ワックスを引き取り、販売する予定である。なお、ワックスはディーゼルやナフサよりも付加価値が高い。

(10)Brightmark Energy(米国、サンフランシスコ)

2018年11月にBrightmark Energyは1,000万ドルでオハイオベースのエネルギー会社のRES Polyflowの50%以上の株式を取得した。

2019年11月5日に、同社は米国で10億ドル規模の先進的な廃プラ処理設備を建設すべく、用地選定作業に入ったことを発表した。2020年第3四半期に候補地を決定する予定である。

同社は当面、製品をディーゼル、ナフサ、ワックスとして販売する予定であるが、将来的には、ナフサクラッカー原料に販売することに集中したい意向である（欧米のナフサクラッカーは熱分解油（ナフサ）確保に動いているので、燃料用途よりも高い価格で販売できるのかもしれない）。

(11)Plastic2Oil(JBI,Inc.、米国 カリフォルニア州)¹²

JBI, Inc. は、Plastic2Oil 技術を開発した。選別していない、洗浄していない廃プラから超クリーンな超低イオウ含量の燃料を製造できる。プロダクトはナフサ、No.2 燃

¹² <http://www.plastic2oil.com/site/home>（横型反応器の写真あり）

料（ディーゼルほか）、No.6 燃料（重油）である。好ましい廃プラ原料は、HDPE、LDPE、PP その他である。PET と PVC は受け入れられない。

Plastic2Oil は米国に 3 か所の工場を有している。2013 年に最新のニューヨーク州ナイアガラフォールの工場が完成した。廃プラから熱分解油への転化率は 86%、8.3 ポンドの廃プラから約 1 ガロンの燃料が得られる（1 kg の廃プラから 1 リットルの燃料が得られる）。オフガス（生成物の 10~12%）は工場内燃料に使用される。ペトロコークスは 2~4% である。

(12) Klean Industries (カナダ バンクーバー)¹³

Klean Industries は旧札幌プラスチックリサイクルの熱分解技術（IP を含む）を取得し、それをベースに活動している。

3.3 熱分解油メーカーのまとめ（生産能力、技術、熱分解油の組成と収率）

表 7 に熱分解油メーカー 13 社（欧米 12 社と旧札幌プラスチックリサイクル）の提携ナフサクラッカー、生産能力、熱分解油収率、「プロセス名」、反応条件をまとめた。

a. 生産能力

13 社の多くが開発段階で、ベンチ、パイロットスケールである。Neste を別にする、事業化しているもののうち、規模の大きいものは Plastic Energy のスペイン 2 工場（7,000 トン/年と建設中の 2 万トン/年）、Quantafuel の新設工場の処理能力 18,000 トン/年、Nexus Fuels の 50 トン/日、RES Polyflow の建設中の処理能力 10 万トン/年（4 系列）の 5 か所である。熱分解法のコスト競争力を高めるためには、廃プラ処理能力 10 万トン/年規模が必要である（コストについては、3 章 3.5 参照）。

b. 熱分解油収率とナフサ収率（製品）

表 7 によれば、熱分解油収率は廃プラ 1 トン当たり、850 リットル（Plastic Energy の modular plant）、800 kg（比重 0.8 として 1,000 リットル、Quantafuel）、

¹³ <http://www.kleanindustries.com/s/CorporateProfile.asp>
http://www.kleanindustries.com/s/sapporo_plastics_pyrolysis_recycling_plant.asp

1,000 リットル (Cynar)、1,000 リットル (Plastic2oil) となっている。確実なところは廃プラ 1 トン当たり、熱分解油 850 リットル程度であろう。

表 7 によれば、熱分解油は幅広い留分¹⁴ (ナフサ (ガソリン) - 灯油 (ケロシン) - 軽油 (ディーゼル) - 重油) からなっており、ナフサの留分の比率は 20~30% と低い。したがって、現状では熱分解油はナフサクラッキング原料としては収率やリサイクル率の観点で不十分である (3 章 3.6 参照)。

c. 技術

技術のポイントは、熱分解炉の設計と運転条件、触媒の有無、分解生成物の精製技術などである。熱分解炉としては、静置型・回転型 (ロータリーキルンなど)、縦型・横型、伝熱媒体としてボールや粒子の使用、重合器にコンタクター (蒸留装置) を結合する方法 (Cynar) などが試みられている。熱分解温度は約 400℃ である。熱分解反応は吸熱反応なので、いかに効率的に加熱して短時間で所定温度に上げるかが重要である。

触媒としては、接触分解に使われているゼオライト (HZSM-5 など) が利用されているものと思われる。熱分解時に分子量の高い留分を触媒的に分解して軽質留分 (ナフサなど) にするので、ナフサ収率が上がる。触媒を使用しているのは Recenso と Quantafuel の 2 社、使用していないのは Plastic Energy、Cynar、Klean Industries、旧札幌プラスチックリサイクルの 4 社で他の 7 社は不明である。なお、三井化学は接触分解触媒を使っていると報告書に記載されている (18~19 頁)。また 2000~2004 年に稼働した道央油化センターも触媒に ZSM-5 を使用していた。

¹⁴ 石油留分については 4 頁の表 4 参照。

表 7 熱分解油メーカーの概要

熱分解油メーカー (所在地)	提携ナフ サクラッ カー	生産能力	熱分解油収率	「プロセス名」 反応条件	備考
Recenso (ドイツ)	BASF	大規模パイロット建設中 (BASF支援)	「CTC: Catalytic TriboChemical Conversion 触媒・摩擦的化学変換」、分解温度400°C		農業廃棄物の処理も可能
Quantafuel (ドイツ)	BASF	建設中 (2020年稼働) 能力18,000トン/年、製品 1,500万L/年 (デンマーク)	コアは触媒技術、廃プラ100wt%(1トン) に対して、軽質油16wt%(160kg)、ディーゼル56wt%(560kg)、重質油8wt%(80kg)、灰分 (カーボン) 10wt%(100kg)		BASFと共同でプラント建設中
Plastic Energy (イギリス)	SABIC	スペイン2工場で総生産能力は7,000トン/年、オランダ新設工場の生産能力は2万トン/年 (建設中)	製品名: TACOIL 1トンの廃プラから850Lの熱分解油	プロセス名: TAC (Thermal Anaerobic Conversion)	別にアジアに10工場の建設予定 (マレーシア、インドネシア5工場)
Cynar Plc (イギリス)		20トン/日 (アイルランド) 休止	廃プラ1トン当たり、ガソリン200L、ディーゼル700L、ケロシン100L、合成ガス16ガロン、残留炭素5%	熱分解炉の上部にコンタクター (蒸留装置) 設置、触媒は使用しない	Plastic Energyに技術ライセンス
Neste Oyj (フィンランド)	Lyondell-Basell	Renewable Diesel (Hydrotreated Vegetable Oil) 生産能力 300万トン/年	Renewable Dieselの原料は植物油廃棄物や残渣	自ら一般廃プラの熱分解法の開発に取り組む 廃プラ20万トン/年の処理プラント建設を計画	
Recycling Technologies Ltd.		(イギリス) 7,000トン/年 (計画中)	プロセス名: RT7000、Thermal Cracker (高温の粒子状熱媒体を含む流動層タイプ)、商品名: Plaxx®		Neste が1,000万ユーロを投資支援
Fuenix Ecogy Group (オランダ)	DOW	ナフサ、パラフィン、LPGを製造する。1kgの廃プラから、半分の二酸化炭素排出量で70%の再生プラ製造		「Fuenix Ecogy®ハイブリッド技術」、現在技術のスケールアップ中	
Nexus Fuels (米国)	Shell	50トン/日の商業プラント (ジョージア州)		50トン/日のパイロットを建設中 (Shellと共同の Norco Pilot Project)	
RES Polyflow (米国、オハイオ州)		4系列の熱分解油プラント建設中、処理能力は10万トン/年 (インディアナ州)	ナフサ、distillate (中間留分)、パラフィンワックス	デモンストレーションプラントをオハイオ州にもっている	親会社はBrightmark Energy
Brightmark Energy (米国)		(サンフランシスコ) 10億ドル規模の廃プラ処理設備 (熱分解油) 建設用地の検討		当面、ディーゼル、ナフサ、ワックスとして販売。将来はナフサクラッカーへの販売に集中したい	
Plastic2Oil		(米国、カリフォルニア州)	米国に3工場、ナフサ、No.2燃料 (ディーゼルほか)、No.6燃料 (重油) 廃プラ1トンから燃料1,000Lが得られる		
Klean Industries		(カナダ、バンクーバー)	旧札幌プラスチックリサイクルの熱分解技術 (IPを含む) を取得し、それをベースに活動している		
旧札幌プラスチックリサイクル (日本、札幌市)		1万5000トン/年 (2系列)	軽質油31.0%、中質油4.5%、重質油26.5%、オフガス19.5%、油化残渣17.5%、塩酸1.0%	熱分解炉 (熱分解温度400°C) がロータリーキルン型 (コーキング防止用のセラミックボール入り)、無触媒	2001年~2011年稼働

出所: 各社資料より旭リサーチセンターが作成。

3.4 旧札幌プラスチックリサイクルの熱分解技術

日本ではいくつかの企業が国の支援を受けて先駆的に熱分解技術の開発を行ってきた。しかし、ほとんどの企業が技術的あるいは経営的な困難に直面し、事業を継続できなかった。そういう中で、一番最近まで長期間にわたり商業運転を続けてきたのが旧札幌プラスチックリサイクル（2001年～2011年）で、その技術が最も進んでいたと考えられる。先駆的技術なので、現在の欧米の熱分解技術開発に影響を与えているに違いない。公表資料（参考文献⑧、⑮～⑱）に基づいて、以下に紹介する。

(1) 旧札幌プラスチックリサイクル(旧札幌油化)の経緯

- a. 1998年10月に東芝が主体で設立した。札幌市は一株主で土地提供などで支援した。
- b. 2000年運転開始、2001年4月より営業開始した。設備は2系列で、処理能力は1万5000トン/年である。設備投資は52億円で、そのうちの半分が国からの助成金である。容器包装リサイクル法対象の一般廃棄物の廃プラを処理した。塩素系樹脂（PVCなど）が入っていても処理できるようにするための脱塩前処理設備がある。
- c. 2011年1月に累積約20億円の損失で会社は解散¹⁵した。その原因は、①予想していなかった鉄鋼メーカーの大規模設備によるケミカルリサイクルへの参入、②容器包装リサイクル法対象廃プラの入札がマテリアル（メカニカル）リサイクル優先なために、必要な量の廃プラを手に入れることができなかったためである。
- d. 旧札幌プラスチックリサイクルの技術は、Klean Industries（カナダ・バンクーバーのエンジニアリング会社）が継承している（Klean IndustriesがIP（知財権）を所有）。Klean IndustriesはDOWと契約を結び、2013年にDOWを旧札幌プラスチックリサイクルの工場に案内している。ただし、その後の発展はない。

(2) プロセスの特徴¹⁶

プロセスフローを図7に示す。プロセスの特徴は①熱分解する前に、PVCを熱分解して塩化水素を発生させ塩素を除去する前処理工程（300～320℃で熱分解）があること、

¹⁵ 札幌市議会議事録 <https://chiholog.net/chiholog/gijilog/01100-20110210-f4dc3bc/ja>

¹⁶ 参考文献⑨ 179-192頁、橘 秀昭「一廃系軽廃プラスチック油化実用化技術の最新動向」

②熱分解炉（分解温度 400℃）がロータリーキルン型（ロータリーキルン内にコーキング防止用のセラミックボールを入れてある。図 8 参照）で外部ジャケット（800℃の熱風）から加熱する方式を採用していること、③触媒は使用していないことである。

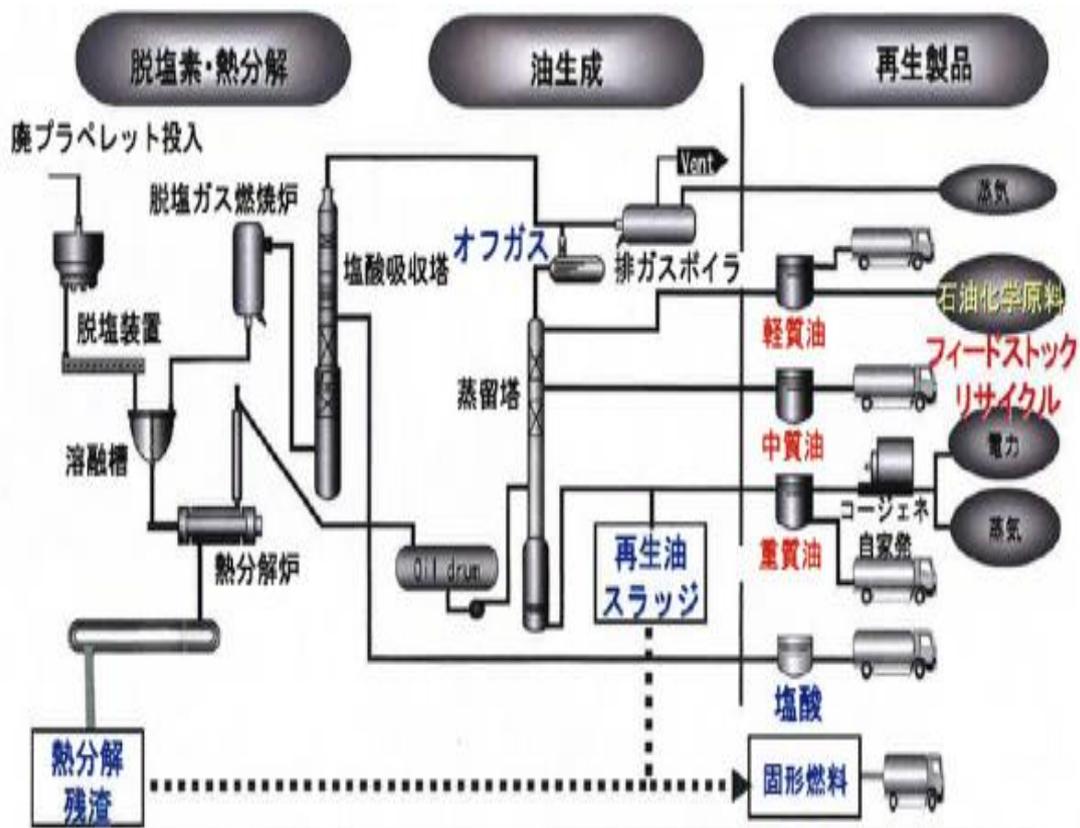


図 7 旧札幌プラスチックリサイクルの廃プラ熱分解プロセスフロー

出所：塩谷操「札幌プラスチックリサイクルを中心とした油化手法の概要」（2007年2月）。

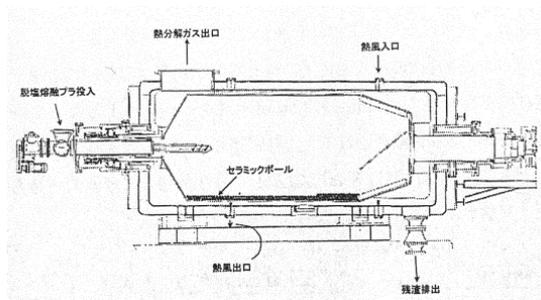


図 8 ロータリーキルン型熱分解炉

出所：参考文献⑨ 179-192 頁、橘 秀昭「一廃系廃プラスチック油化実用化技術の最新動向」。

また、PET 混入廃プラによる工場の腐食問題やつまりの問題があったが、解決した。

運転成績の 1 つである物質収支は、乾燥ペレット 100（重量）に対し、生成物 100（重量）でその内訳は、軽質油 31.0%（うち、20%は熱分解炉の燃料、11%はケミカルリサイクル用に石油精製へケミカルリサイクル）、中質油 4.5%（外部ボイラー燃料）、重質油 26.5%（うち 21%は工場内部のコージェネ発電用燃料、5.5%は外部ボイラー燃料）、オフガス 19.5%（内部ボイラー燃料）、油化残渣¹⁷17.5%、塩酸 1.0%である。軽質油・中質油・重質油を合わせた油分は 62.0%である。したがって、廃プラ（乾燥ペレット）1 トンあたり、620 kg（比重を 0.8 とすると 775 リットル）の熱分解油が得られることになる。

3.5 熱分解法と他のケミカルリサイクル手法のコスト比較

熱分解法と他のケミカルリサイクル手法の再生処理コストと損益を表 8 に示す。

表 8 各種ケミカルリサイクルの再生処理コストと損益の試算

	単位	PET解重合法	熱分解法	ガス化法	コークス炉化学原料 化法	高炉還元剤法
処理能力	千トン/年	30	15	60	40	30
投資額	億円	80	50	80	30	40
廃プラ入札単価 (委託処理費)	(円/kg廃プラ)	38	74	74	74	74
再生処理コスト	(円/kg廃プラ)	▲140~160	▲130~160	▲65~80	▲45~65	▲55~70
(内設備関連コスト)	(円/kg廃プラ)	(▲59.1)	(▲73.9)	(▲29.6)	(▲16.7)	(▲29.6)
再生品平均販売単価	(円/kg廃プラ)	P	S	G	C	K: コークス代替分
(再生品の品目)		(PET樹脂ペレット)	(熱分解油・オフガス・ 油化残渣)	(合成ガス)	(コークス・オイル・ ガス)	(コークス代替)
利益 (損益)	(円/kg廃プラ)	38+P-(140~160)	74+S-(130~160)	74+G-(65~80)	74+C-(45~65)	74+K-(55~70)

出所：黄色地は参考文献⑧ 経済産業省「プラスチックのケミカルリサイクルの動向調査」報告書（2005年）。https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h16fy/160629-1_drmi.html
その他は旭リサーチセンターが作成。

¹⁷ 油化残渣はエコペレットといい固形燃料として有効利用された。油化残渣の組成は C（炭素）46.5%、H（水素）3.3%、O（酸素）18.2%、SiO₂（シリカ）4.5%、Al（アルミ）1.5%、Ca（カルシウム）10.0%、その他 16%で、燃料になる成分（C と H）は約 50%含まれている。

黄色地の部分は経済産業省の委託を受けたダイヤリサーチマーテックが試算したものである。その他の白地部分は旭リサーチセンターが追加したものである。15年前のものであるが、相対的には妥当と考えられる。また、表8の熱分解法は旧札幌プラスチックリサイクルを想定したものである。

まず、再生処理コストが一番安いのはコークス炉化学原料化法の45～65円/kg廃プラ（円/kg廃プラは、以下円/kgと略す）で、次いで高炉還元剤法の55～70円/kg、ガス化法65～80円/kgである。それらに比べて、熱分解法は130～160円/kgと2～3倍の再生処理コストである。熱分解法とPET解重合法の再生処理コストが高い一因は、処理能力の割に設備費が高いことと、単独工場を前提にしているためと考えられる。

表8に設備関連コスト（7年定額償却費と補修費・税金・金利（設備費の8%）の合計）を示すが、熱分解法は73.9円/kg、PET解重合法は59.1円/kgで、コークス炉化学原料化法の16.7円/kgやガス化法・高炉還元剤法の29.6円/kgよりもはるかに高い。

表8では利益（損益）も推定した。2004年度（参考：2018年度）の廃プラの委託処理費（容器包装リサイクル法の入札価格）は、ケミカルリサイクル用74円/kg（43.4円/kg）で、PETボトルは38円/kg（-33.4円/kg）であった。

コークス炉化学原料化法の損益は、委託処理費として74円/kgを受け取り、再生処理コストが45～65円/kgかかり、再生品のコークス・オイル・ガスを化学品評価・燃料評価でC円/kgの収入があるとすれば、利益は $74+C-(45\sim65)$ 円/kgとなり、十分利益が得られる。一方、熱分解法は74円/kgの委託処理費を受け取るが、委託処理費の約2倍の再生処理コスト（130～160円/kg）がかかり、販売できる製品はほとんど燃料なので単価は安くその収入をS円/kgとすると、利益は $74+S-(130\sim160)$ 円/kgとなる。損益は厳しいと推定される。

PET解重合法は、再生PET樹脂を燃料に比べて高い価格で販売できる分有利である。なお、PETボトルは2014年度には38円/kgの委託処理費が出ていたものが、2018年には33.4円/kgで有償で購入しなければいけない状況になっている。2018年度の採算は厳しいであろう。なお、ケミカルリサイクル用の委託処理費も2014年度の74円/kgから2018年度の43.4円/kgに下がっている。

各種ケミカルリサイクルによる再生材は主にナフサ、燃料、プラスチックであり、これらは市場でバージンのナフサ、燃料、プラスチックと競合しなければならない。これらバージン製品は原油価格にリンクしている。原油価格が高いときはバージン品の売値は高いので再生材のコスト競争力は高いが、昨今のように原油価格が低迷している時にはバージン品の売値は安いので再生材のコスト競争力は低下する。

実際、図9に示すように、2007年から2014年にかけては80～100ドル/バーレルの原油高（リーマンショックを除く）が続いたが、2015年以降現在までシェール革命とイランの原油輸出再開により原油価格は50ドル/バーレル程度に低迷している。このような原油安の状況では、リサイクル事業（特に熱分解油事業）は採算的に厳しいと思われる。

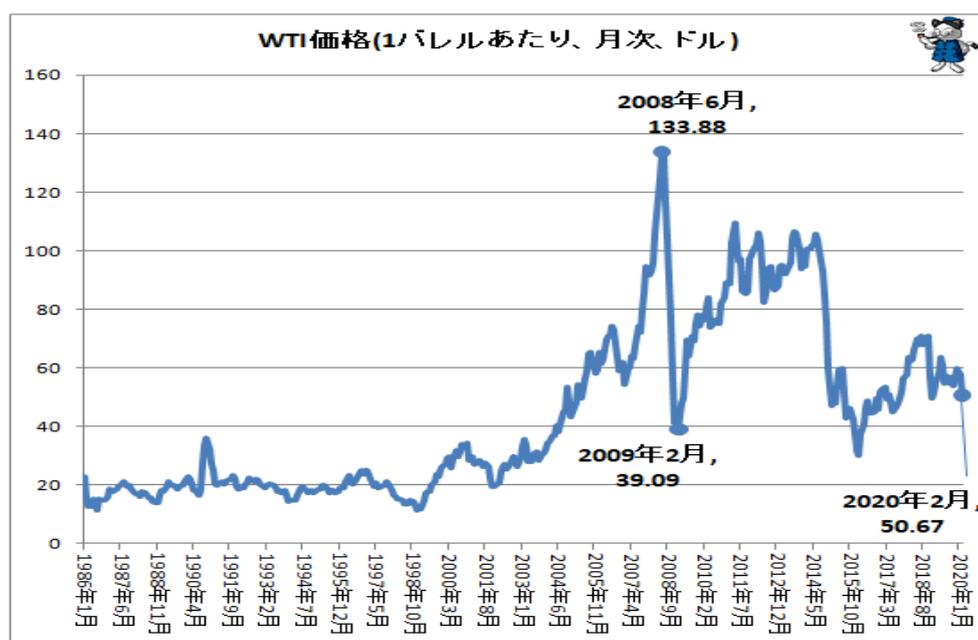


図9 WTI原油先物価格の推移

注：2008年9月リーマンショック、2016年シェール革命による最安値。

出所：Livedoor News、<https://news.livedoor.com/article/detail/9594772/>。

このような厳しい経営環境にもかかわらず、欧米では大規模な熱分解油工場やガス化工場が建設されようとしている。埋立や焼却を減らしサーキュラーエコノミーを実現しようとする政府、企業、社会の強い力が働いている背景があるためだろう。

3.6 「熱分解（油）—ナフサクラッキング」法の課題と対策

(1) 熱分解油工場の規模が小さく、また供給能力も小さい。「熱分解（油）—ナフサクラッキング」法を大規模に実施するには、ナフサクラッカーに見合った規模の熱分解油工場の新設が必要である。また、コストが高いという課題もある。半面、技術開発とスケールアップによりコストダウンができれば、大規模投資で大型熱分解油工場を建設し、大きな利益を得るビジネスチャンスかもしれない。CO₂ 排出に炭素税がかかるようになると追い風となる。

(2) 熱分解油中のリサイクルに使えるのはナフサだけか

前述のように（27 頁の b. 熱分解油収率とナフサ収率）、熱分解油はナフサ、灯油、軽油、重油の留分（各石油製品の名称と性状は 4 頁の表 4 参照）からなっていて、ナフサ留分の比率は 20～40%と低い。ナフサ留分だけをナフサクラッカーにかけるのでは、熱分解法のリサイクルの比率は相当低くなってしまう。

この課題を克服するためには、①ナフサ収率を大幅に上げる触媒やプロセスを開発するか、あるいは②ナフサだけでなく、軽油（ガスオイル）、灯油もナフサクラッキングにかけられるようにするかの 2 つの方策が考えられる。

①の触媒については、前述のように触媒を使っているメーカーと使っていないメーカーがあり、将来どちらが主流になるかわからないが、触媒開発のブレイクスルーを期待したい。

②については、クラッカーはナフサ原料を使用するものが主流であるが、ガスオイル（軽油）を原料にするものもある（参考文献④）。理想は、ナフサとガスオイルを同時に使用できるフレキシビリティをもつクラッカーである。なお、日本はナフサ専用のクラッカーがほとんどである。

なお、前述のように（17 頁）、LyondellBasell は Neste の Renewable Diesel（軽油、あるいはガスオイル相当）をナフサクラッカーにかけているので、フレキシビリティのあるクラッカーである。

4. 「ガス化（合成ガス）—化学品」法の詳細

4.1 概要

昭和電工は 2003 年より川崎事業所でガス化工場を稼働中で、合成ガス（一酸化炭素（CO）と水素（H₂）の混合物）からアンモニアを製造している（廃プラ 6.4 万トン/年から、アンモニアを 5.8 万トン/年製造）。設備投資は 84 億円である。

元の技術は荏原製作所と宇部興産が開発した EUP プロセスである。荏原製作所と宇部興産の合弁会社のイーユーピーは 2001 年に山口県宇部市で事業化したが、原料廃プラの入手が難しくなったため 2010 年に撤退した。

2019 年 8 月に、日揮、荏原環境プラント、宇部興産、昭和電工の 4 社は協業し、国内外に EUP プロセスをライセンスしていくことを発表した。

欧米では廃プラの埋立をガス化法に替えるニーズが高いが、ガス化技術の開発は必ずしも成功しておらず、撤退している会社が少なからずある¹⁸。この中で、Enerkem（カナダ）はエドモントンで 2017 年より処理能力 10 万トン/年のガス化工場を稼働し、メタノールやエタノールを製造している。

4.2 昭和電工のガス化プロセス（EUP プロセス）の特徴

EUP の加圧二段ガス化技術の心臓部を図 10 に示す。低温（600～800℃）の内部循環流動層（以下、低温ガス化炉：砂を循環流動させている）と高温（1300～1500℃）の旋回溶融ガス化炉（以下、高温ガス化炉）からなる。それぞれの炉にスチームと純酸素が供給される。低温ガス化炉と高温ガス化炉はシリーズにつながっている。高温ガス化炉で発生したガスは炉の下部で水によって急冷される。高温ガス化炉を出たガスは洗浄されて純粋な合成ガスとなる。昭和電工は固有の触媒を用いたシフト反応により、合成ガス（CO+H₂）を水素（H₂）に変えて、その水素をアンモニア製造の原料にしている。また、

¹⁸ KIOR（米国）、Range Fuels（米国）、Sundrop Fuels（米国）、Air Products and Chemicals（イギリス）、Choren Industrietechnik（ドイツ）、Göteborg Energi（スウェーデン）。

反応ガス中には二酸化炭素（CO₂）が含まれているので、冷却してドライアイスとして分離している。ドライアイスは炭酸飲料などに使用されている。

ガス化プロセス全体の詳細は、参考文献⑧、⑨¹⁹、⑩を参照されたい。

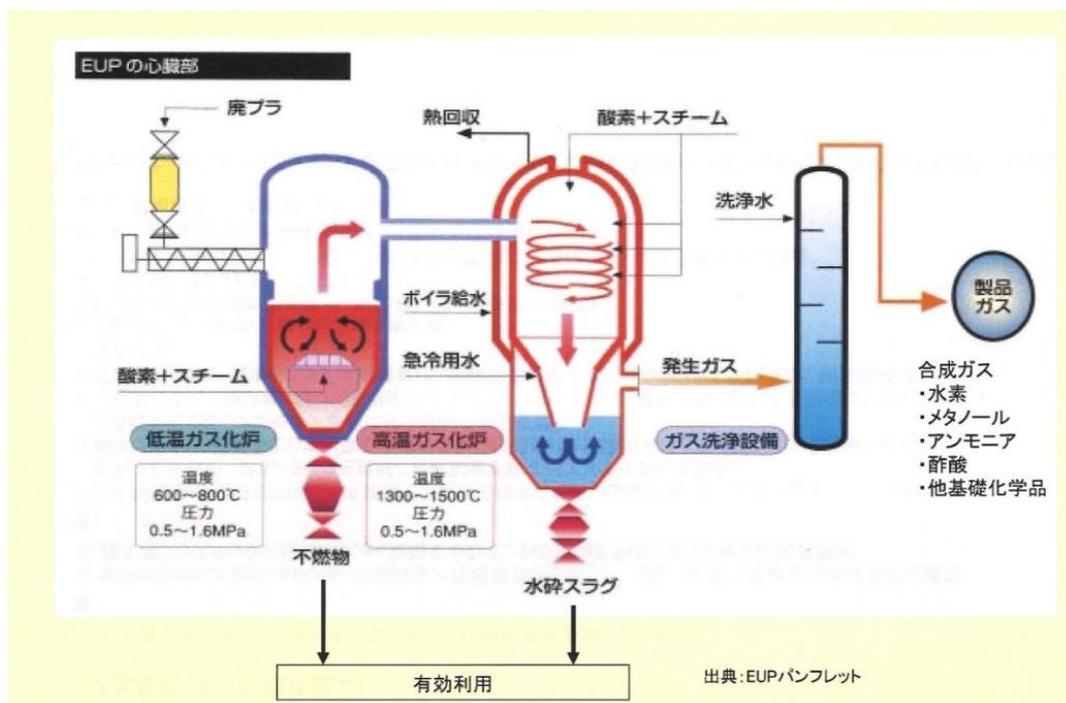


図 10 EUP ガス化技術の心臓部

出所：経済産業省「プラスチックのケミカルリサイクルの動向調査」報告書（2005年）。

4.3 Enerkemのガス化工場

(1)開発経緯

基礎研究から実用化（ベンチャーパイロットー本プラント）まで20年を要したEnerkemの商業プラント（カナダ、エドモントン工場）が2017年に本格稼働した。原料はMSW（Municipal solid waste：都市（固形）廃棄物：紙・段ボール、庭木、プラスチック容器包装材などが多く、欧米では埋め立てられることが多い）である。エドモントン市と年間10万トンのMSWを25年間引き取る契約をしている。生産能力は3,800万リットル/年である。製品は合成ガスから誘導されるメタノール（バイオメタノール）とエタ

¹⁹ 参考文献⑨ 132～138頁、亀田修「廃プラスチックの加圧二段ガス化技術」。

ノール（セルロース系（バイオ）エタノール）である。メタノールからエタノールは合成される。エドモントン工場の現在の主要製品はエタノールで、ガソリンにブレンドして使用される。

(2) Enerkemのバイオアルコールとその背景

米国や欧州では、温室効果ガス（CO₂）の発生が少ないバイオ燃料（米国ではバイオエタノール、欧州ではバイオメタノールや FAME）を車の燃料（ガソリンやディーゼル）に一定量ブレンドすることが法律で義務づけられている。米国の場合は U.S. Renewable Fuels Standard (RFS) とそれに基づいて定期的に決められる「バイオ燃料使用義務量の規則」がある。

米国ではトウモロコシから大量のバイオエタノールが生産され、E10 ガソリン（バイオエタノールを容量で 10% 含有）がすでに実現している。ただし、食料を原料としていることから批判が多く、EPA（米国環境保護庁）は非可食性のセルロース（木質）原料からつくった“cellulosic advanced ethanol”（セルロース系先進的エタノール）を強力に推進し、多額の補助金で開発企業を支援してきた。しかし、開発企業のほとんどが採算が合わず数年前に撤退してしまった。

今回、EPA は Enerkem の MSW（都市（固形）廃棄物）からつくったエタノールを、U.S. Renewable Fuels Standard (RFS) に基づいて製造された“cellulosic ethanol”（セルロース系（バイオ）エタノール）として販売することを承認した²⁰。したがって、Enerkem のエタノールは米国の RFS に基づく「バイオ燃料使用義務量の規則」を満たすためのバイオ燃料として使用できる。これは、Enerkem のエタノールが、廃プラだけでなく紙・段ボールや庭木を含む MSW から再生されたもので、既存のバイオエタノールと同様に CO₂ の排出量が少ないことが評価されたのであろう。新しい動きで注目される。

(3) Enerkem技術の海外展開

Enerkem の技術は注目されており、オランダのロッテルダム港に Enerkem の技術を使った大型工場を建設する計画がある。36 万トン/年の廃棄物から 22 万トン/年（2.7 億リットル/年）のバイオメタノールをつくる（カナダのエドモントン工場の 3.6 倍の規

²⁰ <https://enerkem.com/products/ethanol/>

模である)。2018年にEnerkem（ガス化技術）、Air Liquide（純酸素供給）、Nouryon（オランダ、元AkzoNobel Specialty Chemicals、メタノール誘導体技術）、the Port of Rotterdamがコンソーシアムを立ち上げた。2019年3月にShellがこのコンソーシアムに参加した。FID（the final investment decision）は間もなくといわれる。メタノールの用途については、バイオ燃料とNouryonの各種メタノール誘導体（カルボキシメチルセルロースなど）を考えている。

それ以外にもEnerkem技術を使った米国工場建設の計画もある。欧米ではガス化がMSWや廃プラの埋立を減らす有力な手段として注目されている。

(4) 技術

Enerkemのプロセスルートは、廃棄物+O₂+スチーム→合成ガス（CO+H₂）→メタノール→エタノールである（図11）。最初の反応は迅速で、5分以内に廃棄物が合成ガスに変換するという。合成ガスをメタノールに変換するステップは既存の触媒を使用している。エタノール合成は、メタノールをカルボニル化した後、水素還元してエタノールを得る独自の方法である。廃棄物からのエタノール合成は世界で初めてである。

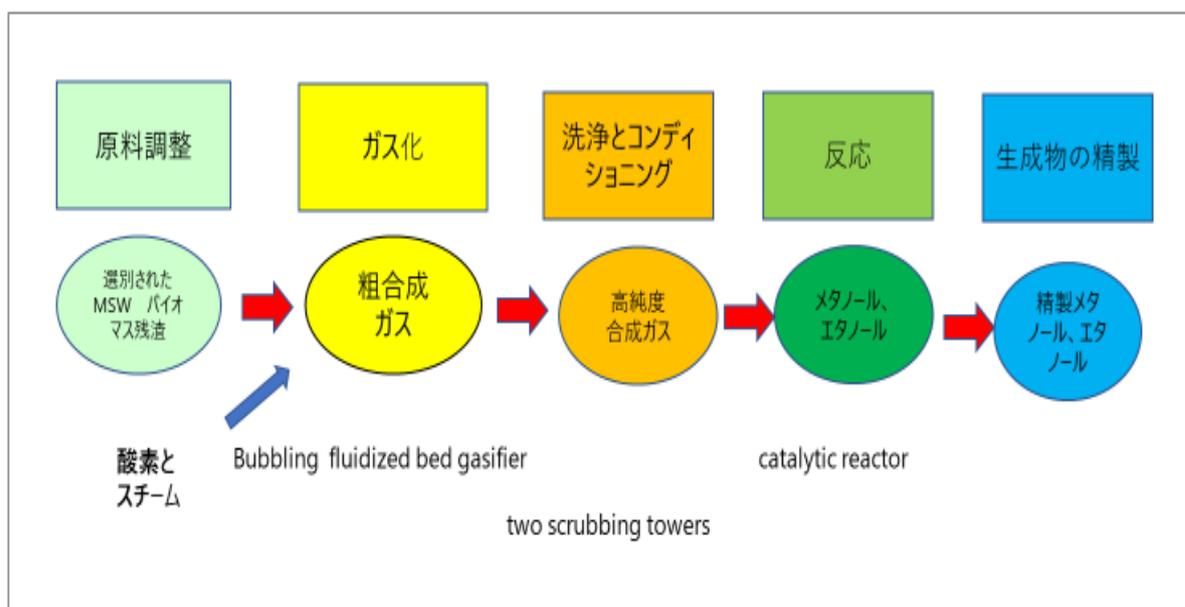


図 11 Enerkem エドモントンガス化工場のプロセスフロー

出所：Enerkem 発表資料を基に旭リサーチセンターが作成。

4.4 合成ガス・メタノール周辺化学の最近の進歩（参考文献④参照）

図 12 に、合成ガス・メタノール周辺化学の最近の進歩をフロー図で示した。まず注目すべきことは、合成ガスは、石油はもとより、天然ガス（メタン）、石炭、バイオマス、廃プラと多様な原料をクラッキングしてつくることができることである。したがって、合成ガス・メタノールとそれらの誘導品の体系は、メタン、石炭、バイオマス、廃プラにとって共通のプラットフォームになる。

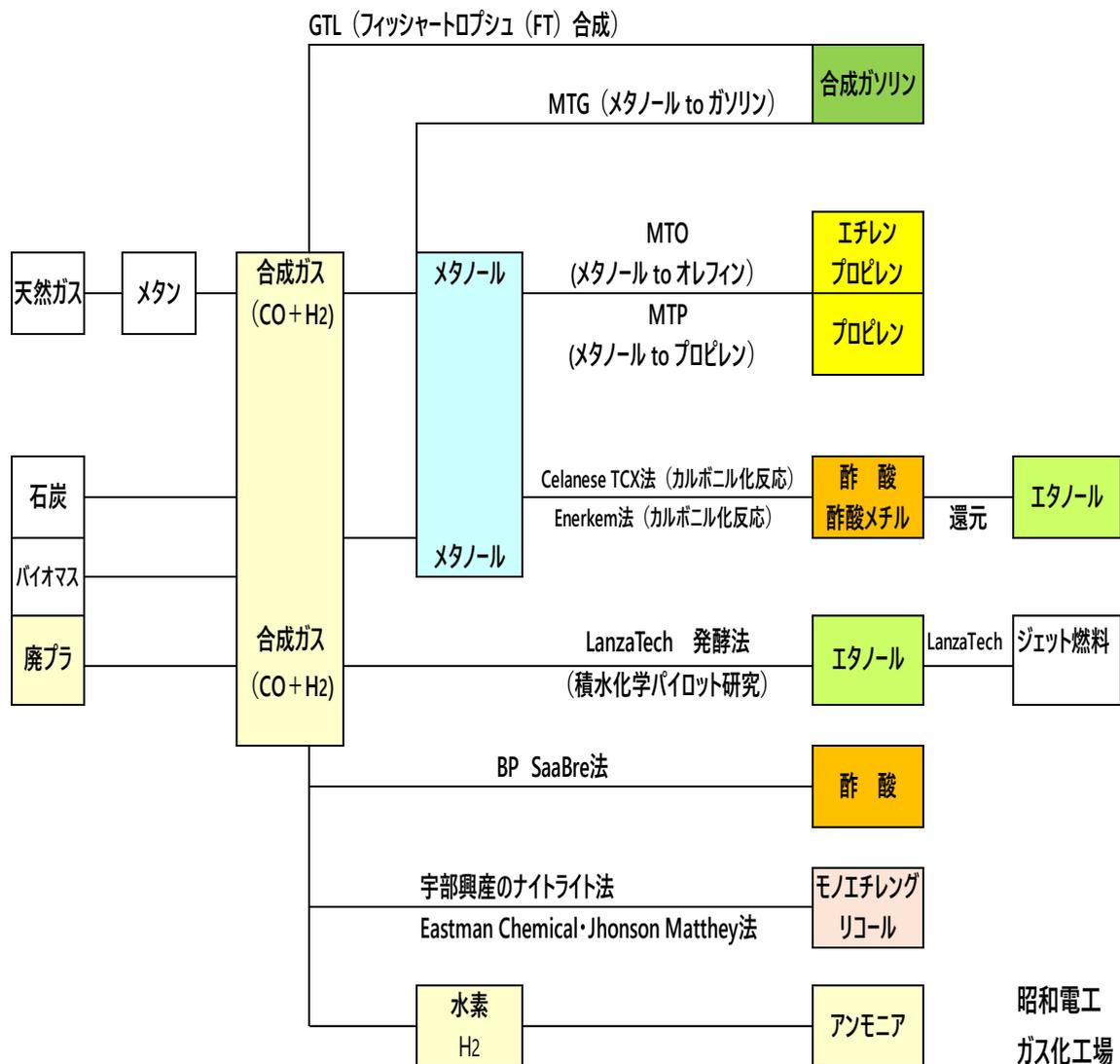


図 12 合成ガス・メタノール周辺化学の最近の進歩

出所：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

図 12 の中で、注目される技術（反応ルート）としては、

- ①合成ガスからフィッシャートロプシュ反応による合成ガソリンの製造
- ②Celanese の TCX 法エタノール合成（中国の合弁企業で工業化）²¹
- ③Enerkem のバイオメタノールとセルロース系（バイオ）エタノールの合成
- ④LanzaTech の合成ガスを原料とする発酵法エタノール合成とエタノールからのジェット燃料の合成（ATJ）²²
- ⑤BP の 1 段法酢酸合成（SaaBre 法²³、中東オマーンで 10 億ドル投資の大規模工場計画（2023～24 年稼働予定））²⁴
- ⑥宇部興産による合成ガスからのナイトライト法モノエチレングリコール合成（日本と中国で実用化）
- ⑦Eastman Chemical と Johnson Matthey が開発した合成ガスからモノエチレングリコール合成技術（Davy MEG technology : Inner Mongolia Jiutai（中国）が 100 万トン/年の工場にこの技術を採用²⁵） などがある。

このうち、LanzaTech 技術については、積水化学が埼玉県寄居市のオリックス資源循環株式会社（廃プラをガス化して合成ガスをつくり、発電用燃料に使用中）敷地内にパイロットプラントを建設し、廃プラ由来の合成ガスから発酵法でエタノールを製造する研究を行った²⁶。そして今回、積水化学は技術の実用化のための実証事業を発表した（2020 年 4 月）。以下に発表の抜粋を示す。

『“ごみ”を“エタノール”に変換する技術の事業化を目的に合弁会社を設立

積水化学工業と株式会社 INCJ はこの度、積水化学と米国ベンチャー企業 LanzaTech が共同開発した、微生物触媒を活用して可燃性ごみをエタノールに変換する技術（以下、

²¹ <https://www.greencarcongress.com/2018/07/20180719-celanese.html>

²² <https://www.greencarcongress.com/2019/11/201091121-lanzatech.html>

²³ <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-reveals-new-technologies.html>（2013 年 11 月発表）

²⁴ <http://omangbnews.com/news/2017/11/02/bp-and-oman-oil-move-forward-with-lbn-acetic-acid-scheme>（2017 年 11 月発表）

²⁵ <https://www.chemanager-online.com/en/news-opinions/headlines/china-picks-jmeastman-meg-process>（2018 年 9 月発表）

²⁶ <https://japan.cnet.com/release/30243301/>（2018 年 4 月 17 日発表）

「BR エタノール技術」) の実証事業の実施、および事業展開を行うことを目的として、合弁会社「積水バイオリファイナリー株式会社」を設立しました。合弁会社においては、BR エタノール技術の実用化・事業化に向けた最終段階の実証を行うため、まず、岩手県久慈市に実証プラントを新設し、2021 年度末に稼働を開始、実証事業を行う予定です。実証プラントでは、標準的な規模のごみ処理施設が処理するごみの 1/10 程度の量（約 20t/日）を既存ごみ処理施設から譲り受けて原料とし、エタノールを生産する予定です。』

また、積水化学は住友化学と共同で廃プラから製造したエタノールを原料にポリオレフィンをつくるサーキュラーエコノミーに取り組むことに合意した²⁷。

図 13 は、2014 年頃の中国における石炭を原料とする合成ガス・メタノール化学の工業化状況をまとめたものである。メタノールを原料に MTO プロセス（SAPO-34 モレキュラー触媒）でエチレンとプロピレンを、また MTP プロセス（HZSM-5 ゼオライト触媒）でプロピレンをつくるプロセスが大規模に工業化された。MTO と MTP によるオレフィン（エチレンとプロピレン）の総生産能力は今や 1,000 万トン/年に達している。なお、合成ガス・メタノール周辺の各種反応は、廃プラ由来やバイオマス由来の合成ガスにも当然利用できる。

²⁷ <https://www.sumitomo-chem.co.jp/news/detail/20200227.html>

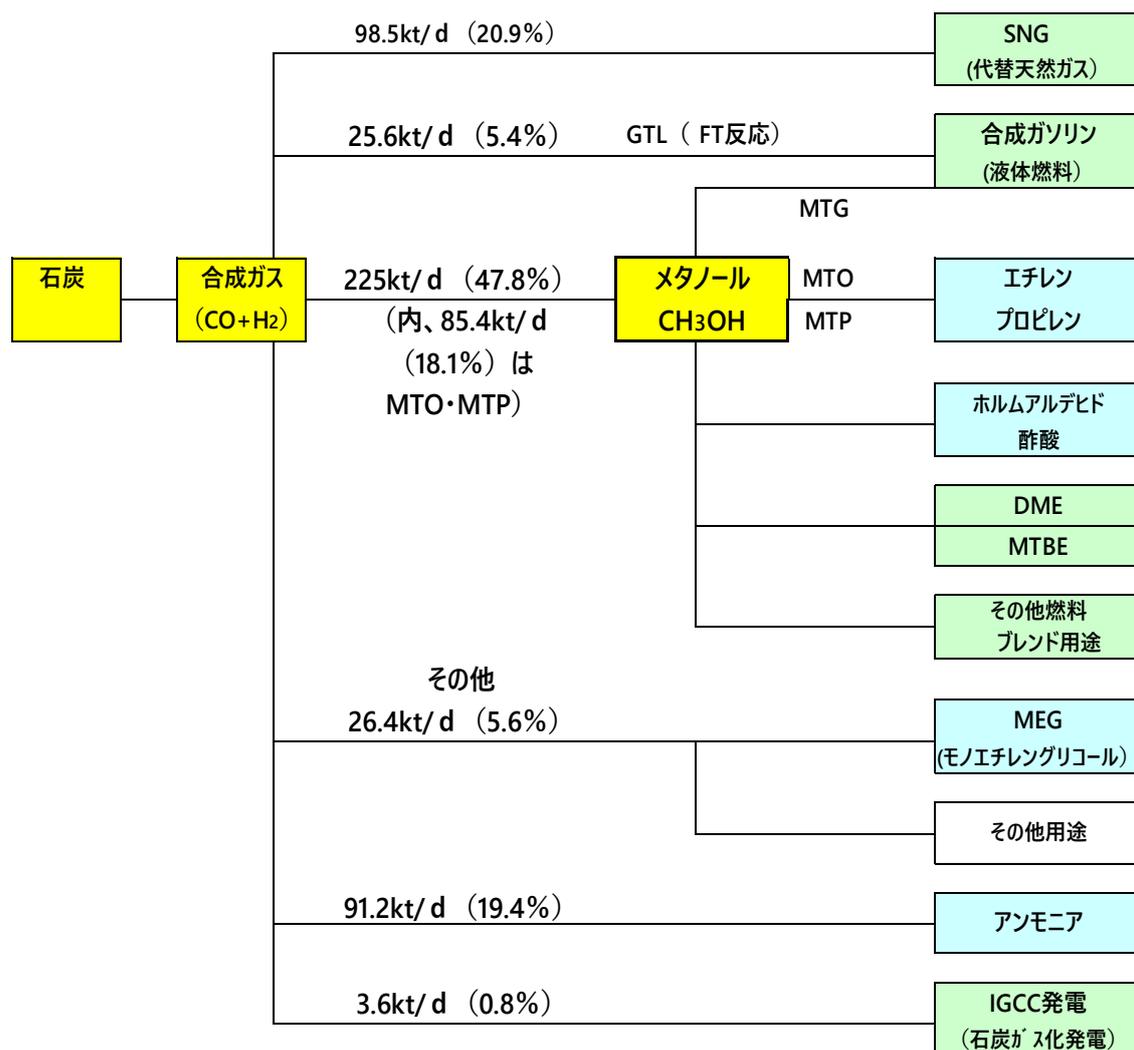


図13 中国における石炭由来の化学品製造(～2014年)(単位kt-coal/d)

注：DMEはジメチルエーテル、MTBEはメチルターシャリーブチルエーテルの略。

出所：林石英、石田道昭「中国における石炭高度利用の現状と展望」化学経済2014年12月号44頁を基に旭リサーチセンターが作成。

おわりに

1. ケミカルリサイクル発展への期待：メカニカルリサイクルが不可能なためこれまで埋め立てられていた汚染した混合廃プラがケミカルリサイクルにより、元のプラスチックに再生したり、有用な化学品に変換されることは素晴らしいことである。世界的にこの動きが大きく広がることが期待される。
2. 日本はケミカルリサイクルの先駆者：表 2 に 1995 年以降のリサイクル関連の年表を載せた。1995～2000 年にかけてプラスチック循環と地球温暖化にかかわる法律が制定され、その対応として、日本において 1999 年から 2005 年にかけてケミカルリサイクルやメカニカルリサイクルの工場が一斉に稼働を開始した。その中には PS や PET の解重合法、混合廃プラの熱分解法・コークス炉原料化法・高炉還元剤法・ガス化法があり、いずれについても世界のトップクラスであった。今後も革新的技術が日本で開発されることが期待される。
3. 「熱分解（油）—ナフサクラッキング」法（略号：熱分解法）の期待と課題：混合廃プラをクローズドループでケミカルリサイクルできる手法であり、期待される。課題は、熱分解油工場のスケールアップと大型設備投資による大規模生産体制の構築と原油安環境下でのコスト競争力確保にある。この課題を解決できれば、投資規模の大きいビジネスチャンスになる。本手法がケミカルリサイクルの切り札になるか、量的に限られ免罪符に終わるか、注視していきたい。
4. ケミカルリサイクルにもバイオエコノミーの新しい波が押し寄せている。Carbios による酵素による PET ボトルの解重合、Neste—LyondellBasell の Renewable Diesel 由来のバイオ PE・バイオ PP の製造、Recenso の農業廃棄物の熱分解による熱分解油の製造、Enerkem のガス化法による MSW（都市（固形）廃棄物）からのバイオメタノールとセルロース系（バイオ）エタノールの製造、LanzaTech—積水化学の廃プラ由来の合成ガスから微生物を利用したエタノール製造などであり、大変注目される。

謝辞

資料提供と適切なアドバイスを頂いたアイシーラボ代表の室井高城氏に感謝いたします。

参考文献

(1) ARCレポートほか：府川伊三郎

① 海洋プラスチックごみとマイクロプラスチック（上） 2017年11月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1019.pdf

② マイクロプラスチック：海洋プラスチックごみとマイクロプラスチック（下）

2017年12月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1020.pdf

③ 浮遊するPE・PPマイクロプラスチックの生成と行方 2018年7月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1026.pdf

④ 「石油化学」から「天然資源化学」へ 2014年4月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-970.pdf

石炭由来オレフィンの技術と競争力、化学経済 2014年12月号36頁

天然ガス化学、石油化学、石炭化学 2017年3月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1011.pdf

⑤ シングルユースプラスチックとそれを取り巻く国際的動き 2019年8月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1037.pdf

⑥ 日本のプラスチックリサイクルの現状と課題 2019年9月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1039.pdf

⑦ リサイクルが進むPET樹脂は循環経済を実現するか 2020年2月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1043.pdf

(2) 全般

- ⑧ 経済産業省「プラスチックのケミカルリサイクルの動向調査」報告書（ダイヤリサーチマーテック 2005年）

https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h16fy/160629-1_drmi.html

- ⑨ プラスチックリサイクル化学研究会監修「プラスチック再資源化の基礎と応用」シーエムシー出版 2005年

- ⑩ プラスチック循環利用協会「プラスチックリサイクルの基礎知識」（2018年、2019年）

- ⑪ 日本容器包装リサイクル協会「年次レポート 2018年、2019年」

(3) プラスチックの熱分解関係

- ⑫ 柴田充弘「基本高分子化学」256-262頁、三共出版（2012年）

- ⑬ 大谷肇、柘植新「高分子の熱分解特性」高分子、46巻6号、264頁（1997年）

- ⑭ 三方信行ら「廃プラスチック熱分解特性の研究」新日鉄技報 第360号、38頁（1996年）

(4) 旧札幌プラスチックリサイクル関係

- ⑮ 参考文献⑨ 179-192頁、橘秀昭「一廃系廃プラスチック油化実用化技術の最新動向」（シーエムシー出版、2005年）

- ⑯ 札幌プラスチックリサイクル現地調査記録（2003年3月）

<https://www-cycle.nies.go.jp/precycle/oil/sapporo.html>

- ⑰ 塩谷操「札幌プラスチックリサイクルを中心とした油化手法の概要」（2007年2月）

- ⑱ <http://www.pvc.or.jp/contents/news/34-04.html>

<本レポートのキーワード>

ポリスチレン解重合、混合廃プラの熱分解、ガス化（合成ガス）、クローズドループ、BASF、Neste、LanzaTech、Enerkem、バイオ燃料

（注）本レポートは、ARCのWEBサイト（<https://arc.asahi-kasei.co.jp/>）から検索できます。

このレポートの担当

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

お問い合わせ先 03-6699-2580

E-mail fukawa.ig@om.asahi-kasei.co.jp